

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS
CARRERA DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ORIENTACIÓN EN
AGRICULTURA SOSTENIBLE



**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA DE LA
MICROCUENCA DEL RÍO TURBALA, UBICADA EN LA CUENCA DEL RÍO NARANJO,
GUATEMALA.**

TESIS PRESENTADA POR:

BENJAMÍN FELICIANO LUX CARDONA

CARNÉ: 200840628

ASESORES

Ing. Agr. OSBERTO MALDONADO DE LEÓN

Ing. Agr. CELESTINO ESCOT GÓMEZ

SAN MARCOS, ABRIL DE 2016

TITULO:

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA DE LA
MICROCUENCA DEL RÍO TURBALA, UBICADA EN LA CUENCA DEL RÍO NARANJO
GUATEMALA.**

INDICE GENERAL

I	ACRONIMOS	1
II	RESUMEN.....	2
III	INTRODUCCIÓN.....	3
IV	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
V	JUSTIFICACIÓN	5
VI	MARCO TEÓRICO	6
6.1	Zonas de recarga hídrica.....	6
6.2	Clasificación de zonas de recarga hídrica.....	6
6.2.1	Zonas de recarga hídrica superficial:.....	6
6.2.2	Zonas de recarga hídrica sub superficial:	6
6.2.3	Zonas de recarga hídrica subterránea	7
6.3	Factores que afectan la recarga hídrica.....	7
6.3.1	El clima.....	7
6.3.2	Precipitación.....	7
6.3.3	Evapotranspiración.....	8
6.3.4	El Suelo.....	9
6.3.5	Capacidad de infiltración	10
6.3.6	Topografía	11
6.3.7	Geología.....	12
6.3.8	Cobertura vegetal	13
6.3.9	Uso de la Tierra	13
6.3.10	Escurrimiento	13
6.4	Conceptos básicos relacionados a Cuenca.	14
6.4.1	Cuenca.	14
6.4.2	Cuenca Hidrográfica.....	14
6.4.3	Subcuenca.	15
6.4.4	Microcuenca.....	15
6.4.5	Cuenca Hidrogeológica o Hidrológica.....	15
6.4.6	Línea Divisoria o Parte Aguas:	15
6.4.7	La Cuenca como un Sistema:.....	15
6.4.8	Sistema de clasificación de cuencas	16
6.5	Características Morfológicas de la Cuenca.....	17

6.6	Parámetros físicos.....	17
6.6.1	Área o magnitud de la cuenca, (A_c)	17
6.6.2	Perímetro de la cuenca (P).....	17
6.6.3	Forma de la cuenca.....	18
6.6.4	Índice de Horton (R_f).....	18
6.6.5	Índice Gravelius o Compacidad (IC)	19
6.6.6	Relación de elongación (R_e).....	19
6.7	Características de la red de drenaje	19
6.7.1	Tipos de corrientes	20
6.7.2	Número de orden de cauce (u) y colector principal.....	20
6.7.3	Relación de bifurcación (R_b)	21
6.7.4	Parámetros de relieve.....	22
VII	MARCO REFERENCIAL	26
7.1	Aspectos Generales del área de estudio.	26
7.2	Zonas de Vida	27
7.3	Clima	27
7.4	Régimen de Lluvias	27
7.5	Temperatura.....	27
7.6	Evapotranspiración.....	28
7.7	Fuentes de agua en la microcuenca.....	29
7.8	Aspectos Socioeconómicos	29
7.8.1	Población.....	29
7.8.2	Comunidades de la microcuenca.....	30
7.8.3	Etnias:	31
7.8.4	Idiomas.....	31
7.8.5	Tenencia de la tierra.....	31
7.8.6	Sistemas de producción predominantes	31
7.8.7	Instituciones y organización comunitaria	32
VIII	OBJETIVOS	33
8.1	GENERAL	33
8.1.1	ESPECÍFICOS:	33
IX	MATERIALES Y MÉTODOS.....	34

9.1	Materiales y Equipo	34
9.2	Descripción de la metodología	35
9.3	FASE UNO	36
9.3.1	Delimitación del área de estudio y caracterización morfométrica.	36
9.3.2	Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos (clase textural y capacidad de infiltración).....	38
9.3.3	Determinación del mapa de texturas del área de estudio	39
9.3.4	Distribución de los puntos de muestreo de la velocidad de Infiltración.....	40
9.3.5	Elaboración del mapa de velocidad de infiltración.	42
9.4	FASE DOS	42
9.4.1	Elaboración del mapa de pendientes.....	43
9.4.2	Elaboración del mapa tipo de suelo.....	43
9.4.3	Elaboración del mapa de geología	46
9.4.4	Elaboración del mapa de porcentaje de cobertura forestal	46
9.4.5	Elaboración del mapa de uso del suelo	48
9.5	FASE TRES	48
9.5.1	Delimitación y generación del mapa de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica, de la microcuenca Turbala.....	49
X	RESULTADOS	50
10.1	Delimitación y caracterización morfométrica de la microcuenca del ríoTurbala..	50
10.1.1	Parámetros lineales.....	51
10.1.2	Parámetros de Forma.....	52
10.1.3	Parámetros de la red de drenaje.	53
10.1.4	Parámetros de relieve.....	55
10.2	Descripción y análisis de mapas generados a partir de las variables involucradas en la identificación y delimitación de las zonas de recarga hídrica.....	60
10.2.1	Mapa de pendientes	60
10.2.2	Mapa Tipo de Suelo	61
10.2.3	Mapa de Geología	67
10.2.4	Mapa porcentaje de cobertura forestal.	69
10.2.5	Mapa uso del suelo.	72
10.3	Mapa delimitación de las zonas potenciales de recarga hídrica.....	74
XI	ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y USOS DE LA TIERRA.....	77
11.1	Uso de la tierra:	77

11.2	Intensidad de Uso de la Tierra:.....	78
11.2.1	Tierras con utilización adecuada.....	79
11.2.2	Tierras sobre-utilizadas	79
11.2.3	Tierras sub utilizadas:.....	79
11.3	Estratificación forestal:.....	79
11.3.1	Bosque de coníferas.....	80
11.3.2	Bosque mixto:.....	80
XII	LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE LAS ZONAS DE RECARGA . HIDRICA SEGUN SU POTENCIAL	81
XIII	CONCLUSIONES.....	85
XIV	RECOMENDACIONES.....	87
XV	BIBLIOGRAFIA.....	89
XVI	ANEXOS	92
16.1	Escenarios.....	92
16.2	Cronograma de actividades	96
16.3	Presupuesto	96
16.4	Boleta de recolección de muestras de suelo.....	97
16.5	Boleta de campo velocidad de infiltración.....	98
16.6	Resultados de las muestras de suelo, Laboratorio de suelos.	99
16.7	Graficas de los resultados de las pruebas de infiltración.	100
16.7.1	Pruebas de infiltración en campo.....	101
16.7.2	Mapa de distribución de puntos de muestreo para determinar clase textural y velocidad de infiltración.	102
16.8	Ubicación municipal de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca Turbala.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de cuencas según su tamaño.....	16
Tabla 2.	Clasificación del terreno de la cuenca según porcentaje de pendiente.....	24
Tabla 3.	Escala de clasificación según pendiente.	25
Tabla 4.	Comunidades de la microcuenca Turbala	30
Tabla 5	Matriz para la clasificación y ponderación de pendientes, según la ecuación para la determinación de las zonas de recarga hídrica.....	43

Tabla 6. Matriz para la clasificación y ponderación de texturas del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	44
Tabla 7. Matriz para la clasificación y ponderación de velocidad de infiltración, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	45
Tabla 8. Matriz para la clasificación y ponderación de la geología de suelos, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	46
Tabla 9. Matriz para la clasificación y ponderación del porcentaje de cobertura del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	47
Tabla 10. Matriz para ponderación del uso del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	48
Tabla 11. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.	49
Tabla 12. Clasificación de cuencas según su tamaño.	51
Tabla 13. Formas de la cuenca de acuerdo al Índice de compacidad.	52
Tabla 14. Valores interpretativos de la densidad de drenaje.	55
Tabla 15. Clasificación del terreno en base al porcentaje de pendiente.	58
Tabla 16. Valores y clasificación de coeficientes de Masividad.	58
Tabla 17. Usos de la tierra y actividades productivas.	77
Tabla 18. Matriz de lineamientos generales para el manejo de las zonas de recarga hídrica.	82

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Calculo de la velocidad de Infiltración.	44
Cuadro 2. Red hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.	53
Cuadro 3. Características de la red hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.	53
Cuadro 4. Curva hipsométrica y tabla de frecuencias altitudinales de la microcuenca Turbala.	56
Cuadro 5. Parámetros de relieve de la microcuenca Turbala.	57
Cuadro 6. Parámetros morfométricos resultantes de la microcuenca Turbala.	59
Cuadro 7. Distribución de la pendiente según rango de la microcuenca del río Turbala. .	60
Cuadro 8. Distribución de Clases texturales en la microcuenca Turbala.	62
Cuadro 9. Resultados de tasas de infiltración obtenidas a partir de los datos de velocidad de infiltración, y su respectiva ponderación según su potencial de recarga.	64

Cuadro 10. Ponderación de la Geología de la microcuenca Turbala.....	67
Cuadro 11. Porcentajes de cobertura vegetal y su distribución en la microcuenca de estudio.	70
Cuadro 12. Uso del suelo de la microcuenca Turbala.....	72
Cuadro 13. Distribución de zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Turbala.	76
Cuadro 14. Escenario I, eliminación de la cobertura vegetal y cambio uso del suelo.....	92
Cuadro 15. Escenario II, Incremento de la cobertura vegetal en un 20% e implementación de prácticas de conservación de suelos.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la diferencia de niveles de agua entre ambos anillos (anillos de Munz).	10
Figura 2. Flujo de agua en el suelo generado por el doble anillo	10
Figura 3. Ilustración del efecto de la forma de la cuenca en el tiempo de concentración.	18
Figura 4. Número de orden de corrientes según Horton	21
Figura 5. Relación del análisis hipsométrico de la cuenca.	24
Figura 6. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Turbala.	26
Figura 7. Fases de la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.....	35
Figura 8. Mapa de distribución de los puntos de muestreo para la Textura y Velocidad de infiltración.....	39
Figura 9. Esquema del establecimiento del Infiltrómetro de doble cilindro o Anillos de Munz en campo.	42
Figura 10. Mapa de la cobertura forestal de la microcuenca Turbala.	47
Figura 11. Curvas a nivel a cada 20 m.s.n.m. de la microcuenca Turbala.....	50
Figura 12. Modelo de elevación digital (DEM), 3D de la microcuenca Turbala.....	51
Figura 13. Mapa de la red de hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.	54
Figura 14. Mapa estratos o intervalos altitudinales de la microcuenca Turbala.....	57
Figura 15. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la ponderación de la pendiente.	61
Figura 16. Mapa distribución de clases texturales en la microcuenca del río Turbala.	62
Figura 17. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la ponderación de texturas.	63

Figura 18. Mapa tasas de infiltración de la microcuenca del río Turbala.	65
Figura 19. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la ponderación de las tasas de infiltración.....	66
Figura 20. Mapa potencial de recarga hídrica en base al Tipo de suelo.....	67
Figura 21. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la Ponderación de la Geología.	68
Figura 22. Porcentaje de cobertura forestal en la microcuenca Turbala.....	70
Figura 23. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la ponderación del porcentaje de cobertura forestal.	71
Figura 24. Mapa potencial de recarga hídrica en base a la ponderación de los usos del suelo.	73
Figura 25. Delimitación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en la microcuenca del río Turbala.....	75
Figura 26. Mapa usos de la tierra y actividades productivas	78
Figura 27 Estratificación forestal de la microcuenca Turbala	80
Figura 28. Escenario I Eliminación de la cobertura vegetal y cambio uso del suelo.	93
Figura 29. Escenario II Aumento de la cobertura forestal en un 20% e implementación de prácticas de conservación de suelos.....	94

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Promedio de temperaturas medias anuales para la microcuenca Turbala.	28
Gráfica 2 Promedio de Evapotranspiración mensual multianual de la microcuenca Turbala.	28
Gráfica 3 Fuentes de agua Inventariadas	29
Gráfica 4. Curva hipsométrica y frecuencias altitudinales de la microcuenca Turbala.....	56
Gráfica 5. Comparación de Escenarios.....	95

I ACRONIMOS

CADINSA	Organización de Comunidades Asociadas por el Agua, el Medio Ambiente y la Infraestructura de la Cuenca del río Naranjo
COCODE	Consejos Comunitarios de Desarrollo
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas
MED	Modelo de Elevación Digital
DMP	Dirección Municipal de Planificación
DAPMA	Departamento de Áreas Protegidas y Medio Ambiente
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INE	Instituto Nacional de Estadística
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GTM	Guatemala Transverse Mercator
MAGA	Ministerio de Alimentación, Ganadería y Alimentación
MANCUERNA	Mancomunidad de Municipios de la Cuenca del Río Naranjo
PINPEP	Programa de Incentivos Forestales para Poseedores de Pequeñas Extensiones de Tierras de Vocación Forestal y Agroforestal
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia
SIG	Sistemas de Información Geográfica
URL	Universidad Rafael Landívar
UNR	Unidad de Normas y Regulaciones
USAID	United States Agency for International Development

II RESUMEN

Con el propósito de coadyuvar a un manejo consciente de los recursos naturales de la microcuenca del río Turbala, en especial el recurso hídrico fue necesario desarrollar una investigación de tipo exploratoria. Fundamentalmente, para determinar las zonas de recarga hídrica partiendo de la ecuación de Matus Silva que considera las variables: pendiente, geología, velocidad de infiltración, textura del suelo, uso del suelo y cobertura vegetal; cada una fue analizada detenidamente con el propósito de describir la relación intrínseca que adquieren éstas al determinar el potencial de recarga hídrica del área geográfica.

Este análisis fue posible mediante la implementación de los sistema de información geográfica, recurriendo al software ArcGis, como resultado fue generado el mapa "Zonas Potenciales de Recarga Hídrica, El cual clasifica el potencial de la microcuenca del río Turbala en cuatro categorías según su potencial de recarga hídrica estas son: *Bajo* con un 13.99% [604.01 hectáreas], *Moderado* con un 79.38% [3426.39 hectáreas], *Alto* con un 6.16% [266.06 hectáreas] y *Muy alto* con un 0.17% [7.27 hectáreas].

La implementación de los sistemas de información geográfica para el presente estudio nos dio la pauta de concebir ciertas proyecciones o escenarios, el primero en el que surgió la interrogante de qué pasaría si se eliminara o redujera drásticamente la cobertura forestal y el segundo si esta se viera aumentada un 20% los resultados, manifestaron cambios bastante notorios, para el primer escenario se ve aminorado el potencial de recarga hídrica en un 40%; y en el aumento de cobertura es proporcional denotándose un aumento del 25% de potencial de recarga.

Aunamos a los resultados de esta investigación fue necesario caracterizar morfométricamente la microcuenca determinando dichas propiedades, estas son el primer paso en la búsqueda de las relaciones entre la red de drenaje, las condiciones climáticas, geológicas e hidrológicas que determinan la evolución de la misma. En general, los índices morfométricos para este estudio denotan que se trata de una cuenca catalogada como pequeña, de carácter montañosa, Oval-oblonga a rectangular alargada, su relieve y el aminoramiento de la cobertura forestal en cierta medida favorecen a la vigorosidad de sus avenidas, esto significa que puede intensificar el caudal en corto tiempo en las desembocaduras y puede manifestarse una crecida fuertemente antes de llegar al cauce principal.

III INTRODUCCIÓN

El agua dulce es uno de los recursos naturales del planeta cuya esencialidad para la vida es fácilmente apreciable por todos los individuos, su escasez, sin embargo es menos manifiesta (INAB, 2003). Las fuentes de agua de las comunidades son vulnerables a procesos de contaminación por inadecuada disposición de residuos sólidos y líquidos producto de asentamientos humanos y producción agrícola.

Por otro lado, existe reducción de caudales, debido a los procesos de degradación del recurso bosque y suelo, por avances de la frontera agrícola, estas áreas son de disposición o vocación forestal, con tendencia a altas pendientes y son cabeceras de cuencas (IARNA/URL, 2009).

La microcuenca Turbala cuenta con una extensión de 43.17 kilómetros cuadrados en ella residen alrededor de 31,824 habitantes según (INE, 2010) pertenecientes a los municipios de Palestina de los Altos, departamento de Quetzaltenango, San Antonio y San Pedro Sacatepéquez del departamento de San Marcos. De estos más del 80% su abastecimiento del recurso hídrico proviene de los afloramientos captados en la parte alta, considerando que este recurso es empleado en usos domésticos y procesos de producción agropecuaria (MANCUERNA, 2011).

El objetivo de la presente investigación consistió en identificar y caracterizar las zonas de recarga hídrica de la microcuenca del río Turbala; basado en un modelo metodológico para determinar su potencial; partiendo de la ecuación propuesta por Matus Silva en 2007 que considera las variables: pendiente, geología, velocidad de infiltración, textura del suelo, uso del suelo y cobertura vegetal; cada una de estas, analizadas y ponderadas con el propósito de describir la estrecha relación que estas adquieren en el proceso de la recarga hídrica, vistas también como índices de la degradación de los recursos naturales de la microcuenca de estudio.

Los resultados obtenidos han sido analizados cuidadosamente con el propósito de generar información verídica y particular para la microcuenca Turbala. Los mismos esperamos tomen acción en un correcto uso de sus recursos naturales implicando una buena gestión y administración del recurso hídrico y sus factores intrínsecos.

IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día es ampliamente conocido que el crecimiento poblacional, el avance de la frontera agrícola y los patrones de producción y consumo de alimentos empiezan a generar conflictos por el recurso hídrico, el INAB reconoce que el agua es uno de los recursos naturales que más problemas de uso genera, este se acentúa en las tierras con vocación forestal, donde la misma es un elemento crítico para la captación y regulación del ciclo hidrológico. Sin embargo la distribución de la cobertura forestal nacional muestra que la mayoría de las cuencas hidrográficas han perdido su cobertura natural; según INAB en el 2012, el cambio neto de cobertura forestal a lo largo del período 2006 - 2010 fue de -146,112 hectáreas, traduciéndose en una pérdida anual promedio de 38,597 hectáreas.

Ésta problemática es notoria en la microcuenca Turbala al develarse cambios en el uso del suelo, por avance de la frontera agrícola, según el mapa uso del suelos actualizado al 2012 más del 55% de su área total está ocupada por agricultura limpia anual y sin implementación de prácticas de conservación de suelos, creando conflictos tales como la disminución y contaminación de caudales, la pérdida de cobertura forestal, y pérdida de suelo por procesos de erosión (MANCUERNA, 2011).

Aunado a ello, de la población actual (31,824 habitantes) el 81.12% obtiene el servicio de agua potable, proveniente de los afloramientos de agua captados en la parte alta, el 18.88% restante obtienen su abastecimiento de ríos, riachuelos y pozos; y según MANCUERANA 2011, los caudales han disminuido notoriamente.

La problemática se acrecienta, pues existe un aumento poblacional con una tasa de 2.59%, la cual es superior a la media nacional con una densidad poblacional de 191 habitantes por kilómetro cuadrado. Ahora bien, la población proyectada demandará una mayor presión por el recurso hídrico y este se ve disminuido. Se suma también una inexistente delimitación y caracterización de zonas de recarga hídrica y su respectivo potencial, enmarcado en ellas la disponibilidad del recurso hídrico que abastecen a los asentamientos poblacionales.

Referida a la problemática encontrada, se plantea la siguiente interrogante

¿Cuáles son las zonas de recarga hídrica de la microcuenca Turbala y su potencial?

V JUSTIFICACIÓN

A nivel nacional solo existe un mapa de tierras forestales de captación y regulación hidrológica a escala 1:1,000,000 (INAB., 2005), -ver anexo 1- como una primera aproximación de zonas potenciales de recarga hídrica, esto implica que la información disponible sobre los recursos hídricos a nivel nacional es limitada y/o escasamente específica a nivel local, obstaculizando la planificación a futuro el manejo de los recursos naturales, específicamente del recurso hídrico y otros recursos vinculados a este.

Es preciso iniciar una investigación de tipo exploratorio con la intencionalidad de generar información técnica, científica y fiable, base para la toma de decisiones acertadas en la administración de los recursos agua, suelo y bosque en términos de sostenibilidad. Puesto que la administración forestal en zonas donde se desconoce o no se tiene claridad de la relación hidrológica-forestal y la morfometría de cuencas hidrográficas se enfrenta constantemente a una disyuntiva en la toma de decisiones con respecto a las solicitudes de uso y aprovechamiento de masas forestales y el recurso suelo (Gordillo Ramírez, 2010).

Esta investigación identifica y caracteriza las zonas potenciales de recarga hídrica, condiciones y escenarios óptimos que influyen en la calidad y cantidad del agua de la microcuenca del río Turbala; que alberga ocho comunidades de San Antonio Sacatepéquez, dos comunidades del municipio de San Pedro Sacatepéquez ambos del departamento de San Marcos y veinte comunidades del municipio de Palestina de los Altos departamento de Quetzaltenango, para un total de treinta comunidades; y que en su mayoría sus habitantes se dedican al cultivo de maíz en asocio con frijol, papa y hortalizas dependiendo del recurso hídrico para la producción de los mismos (MANCUERNA, 2011).

Toda la información generada será útil para las instancias de planificación, Departamento de planificación municipal (DMP), Departamento de áreas protegidas y medio ambiente (DAPMA) y el sector institucional que opere en la región, en los procesos de gestión, conservación y restauración de los recursos naturales de la microcuenca. La presente investigación cuenta con la asesoría de la Oficina Técnica de la Mancomunidad de los municipios del río Naranjo (MANCUERNA).

VI MARCO TEÓRICO

6.1 Zonas de recarga hídrica

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

Así mismo, también tenemos que la infiltración es mayor cuando en la zona de recarga o entrada se da además de la precipitación local, el escurrimiento superficial de alguna área tributaria. Esto sucede principalmente en pendientes aluviales que reciben aguas superficiales provenientes de zonas montañosas con fuerte precipitación, *INAB (2003)*.

6.2 Clasificación de zonas de recarga hídrica

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

6.2.1 Zonas de recarga hídrica superficial:

Prácticamente es toda la cuenca hidrográfica, excluyendo las zonas totalmente impermeables, esta es la que se humedece después de cada lluvia, originando escorrentía superficial, según las condiciones de drenaje (relieve del suelo y su saturación). La medición de este caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.

6.2.2 Zonas de recarga hídrica sub superficial:

Es la que corresponde a las zonas de la cuenca con suelos con capacidad de retención de agua o almacenamiento superficial sobre una capa impermeable que permite que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, también dependen de la cantidad de precipitación y el efecto “esponja” del suelo (libera lentamente el agua en su movimiento horizontal). Este caudal se mide igual que en el caso anterior y puede ocurrir después de las lluvias y en épocas secas, cuando el agua proveniente es posiblemente de los bosques.

6.2.3 Zonas de recarga hídrica subterránea

Son las que corresponden a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos, y rocas permeables) en el cual el flujo vertical de la infiltración es significativo, esta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca).

6.3 Factores que afectan la recarga hídrica

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

6.3.1 El clima

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

6.3.2 Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. La precipitación es la cantidad de agua meteórica total, líquida o sólida, que cae sobre una superficie horizontal determinada, llamada sección pluviométrica. Se presenta en forma líquida (lluvia, niebla, rocío) o sólida (nieve, granizo, escarcha), *Kohler Paulus (1986)*. Según Villon citado por (Matus Silva, 2007), las precipitaciones se clasifican en relación al factor que provoca la elevación del aire en la atmósfera.

Precipitación conectiva.

En tiempo caluroso, se produce una abundante evaporación a partir de la superficie del agua, formando grandes masas de vapor de agua, que por estar más calientes, se elevan sufriendo un enfriamiento de acuerdo a la adiabática seca o húmeda.

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

Precipitación orográfica.

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

Precipitación ciclónica.

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

6.3.3 Evapotranspiración

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

La Evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor, y se produce desde: a) la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación; b) las superficies de agua (rio, lago, embalse); c) el suelo, agua infiltrada que

se evapora desde la parte más superficial de suelo, a partir de agua recién infiltrada o en aéreas de descarga.

La Transpiración Es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmosfera, y esta está íntimamente relacionada con las especies de plantas que cubren la superficie del suelo, así como por el área foliar de las mismas.

6.3.4 El Suelo

Debido a que suelos impermeables o compactos impiden o dificultan la infiltración o recarga hídrica, mientras que suelos permeables facilitan la recarga en los acuíferos. Las características del suelo que influyen en la recarga son, la textura, la densidad aparente, grado de saturación del suelo (contenido de humedad) y la capacidad de infiltración.

Tipo de suelo cuando se habla de recarga hídrica el suelo representa una parte fundamental, ya que es en este en donde el agua proveniente de la precipitación, esta es capturada y luego redirigida a los acuíferos que componen el sistema hidrológico de las cuencas.

Aunque las características del suelo que intervienen en el proceso de recarga son muchas, tales como la porosidad, estructura, cantidad de arcillas, presencia de capas impermeables, entre otras; dos propiedades se destacan entre las demás por ser de fácil determinación en campo y aportar datos significativos en cuanto a la capacidad de recarga hídrica; estos son la textura y la capacidad de infiltración del suelo.

Textura del suelo está determinada por la conformación granulométrica o composición mecánica del suelo e indica la proporción que existe entre las diferentes fracciones granulométricas como arena (2 – 0.05 mm), limo (0.05 - 0.002 mm) y arcilla (< 0.002mm). Para determinar la clase textural de los suelos, se realizan análisis mecánicos de laboratorio y los resultados se interpretan a través del triángulo de la textura. La textura del suelo es una de las características básicas del suelo y tiene influencia sobre otras propiedades como las relaciones hídricas, la fuerza o succión con que es retenida el agua por los coloides o arcillas del suelo y el rango de disponibilidad de agua (en porcentaje) para las plantas. Determina parcialmente el grado de aireación del suelo, ya que dependiendo del tipo de textura predominan los macro poros (rango 60 – 100 μ) o los micro poros (menores de 60 μ); y el aire se desplaza más fácilmente en los macro poros.

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

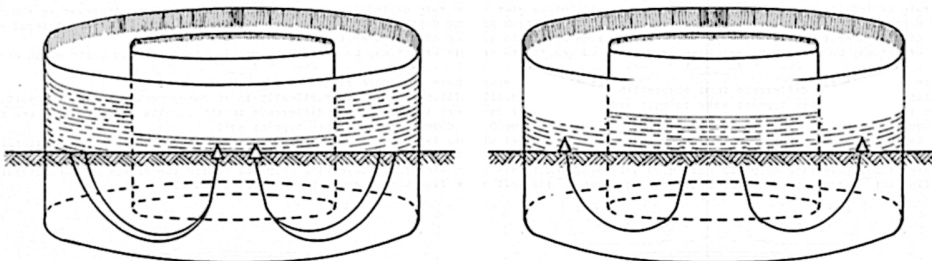
6.3.5 Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración del suelo viene dada en términos numéricos por su velocidad de infiltración, es decir la entrada vertical de agua a través de los poros por unidad de tiempo. Entre los métodos para la determinación de la velocidad de infiltración de un suelo se encuentran; El método de Doble Cilindro o Anillos de Munz, y el método Porchet o de Cilindro Invertido.

Infiltrómetro de doble anillo o anillos de Munz

El método original desarrollado por Munz parte de la idea de que colocados los dos anillos y obtenida la situación de saturación, la diferencia de nivel del agua (H) en los anillos interior y exterior provoca un flujo de agua vertical, que será de entrada hacia el anillo interior si la altura es mayor en el tubo exterior, o de salida si es inferior (Universidad Politécnica de Valencia, 2010).

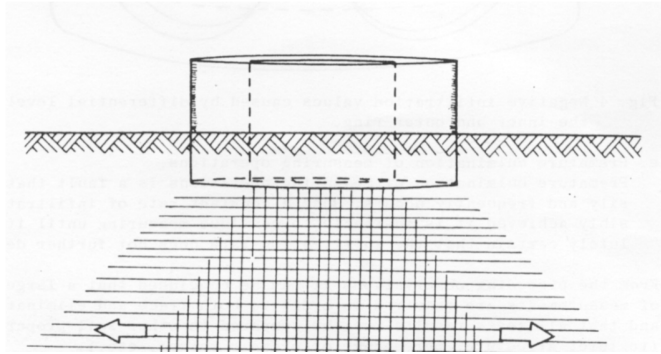
Figura 1. Efecto de la diferencia de niveles de agua entre ambos anillos (anillos de Munz).



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia, 2010

El anillo exterior también tiene como función el evitar la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interior, de tal forma que las medidas se correspondan con seguridad al flujo vertical.

Figura 2. Flujo de agua en el suelo generado por el doble anillo



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia, 2010

6.3.6 Topografía

Esta influye debido al tiempo de contacto que permite entre el agua con la superficie, pendientes fuertes favorecen la escorrentía superficial, disminuyen el tiempo de contacto del agua con la superficie y reducen la infiltración del agua o recarga de los acuíferos.

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

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

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

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

6.3.7 Geología

La geología es la ciencia que estudia la tierra, su composición, su estructura, los fenómenos de toda índole que en ella tienen lugar, y su pasado, mediante los documentos que de él han quedado en las rocas. Según *Escobar* citado por *Matus (2007)*, la geología es la ciencia que estudia el planeta Tierra en su conjunto, describe los materiales que la forman para averiguar su historia y su evolución e intenta comprender la causa de los fenómenos endógenos y exógenos. La unidad de tiempo en geología es el millón de años.

Tipo de rocas, las rocas son agregados naturales que están formadas por minerales que en su estado sólido presentan un patrón atómico y/o molecular ordenado y tridimensional. Los minerales son sustancias inorgánicas con características definidas de color, brillo, dureza, estructura cristalina, composición química, simetría espacial, relación tridimensional de ejes, etc.

El ciclo de las rocas, el magma se transforma en rocas ígneas y de estas pueden generarse sedimentos, rocas sedimentarias o rocas metamórficas. Las rocas ígneas y sedimentarias dan origen a las rocas metamórficas y estas al magma. En general las rocas por su origen se clasifican en: ígneas, metamórficas y sedimentarias.

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

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

6.3.8 Cobertura vegetal

Esta disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie y facilitando el proceso de infiltración del agua, por otro lado gran parte de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección; en este factor es necesario considerar la profundidad radicular y la capacidad de retención vegetal.

6.3.9 Uso de la Tierra

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

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

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

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

6.3.10 Esguerrimiento

El agua que cae proveniente de las precipitaciones forma flujos superficiales, sub superficiales y sub terráneos los cuales son captados por los cauces de los ríos.

El esguerrimiento superficial es un componente del ciclo hidrológico el cual resulta de la lluvia y/o caudal lateral que no llega a infiltrarse sobre la superficie de la tierra.

El escurrimiento superficial en el terreno sigue caminos variables e interconectados debido principalmente a depresiones y vegetación en ella. Por lo tanto no es factible definir un procedimiento puramente determinístico para simularlo por lo que se adoptan aproximaciones al fenómeno y se idealiza a éste como una superficie de agua cubriendo uniformemente la superficie del terreno con una lámina delgada.

6.4 Conceptos básicos relacionados a Cuenca.

6.4.1 Cuenca.

El Proyecto de Desarrollo Forestal de la Sierra de los Cuchumatanes MAGA-PRODEFOR (1996), define la cuenca como el área recolectora de un punto de Interés (toma de agua, presa, boca de río, etc.) de una red de drenaje. También es el total del área que es drenada por un río o riachuelo, aguas arriba de su desembocadura u otro punto de interés.

También se define la cuenca como un área en la cual el agua que cae por precipitación se une para formar un curso de agua principal. En forma más técnica se puede definir como el área drenada por un río. Es un área natural en donde habitan hombres, animales y plantas que generan diferentes ecosistemas (naturales y artificiales) caracterizados por un conjunto de relaciones que identifican a cada uno de ellos y las interacciones generan actividades productivas que buscan mejorar la calidad de vida del hombre.

6.4.2 Cuenca Hidrográfica.

Para la Unidad de Normas y Regulaciones MAGA-UNR (2000), la cuenca hidrográfica es el espacio territorial limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, en el que se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en un río principal que se integra al mar, lago u otro río más grande. Este espacio se puede delimitar en una carta altimétrica en donde se sigue la divisoria de las aguas "divortium aquarum". Los límites están claramente marcados y normalmente no corresponden con límites administrativos u otros límites.

Para Hernández (1997), las cuencas hidrográficas son unidades del territorio donde se combina un sistema hídrico productor de agua, un sistema económico y social activado por el hombre, el capital, el trabajo y la tecnología.

6.4.3 Subcuenca.

Para la Unidad de Normas y Regulaciones del MAGA-UNR (2000), es importante conocer que la subcuenca es como la división de una cuenca. Usualmente cuando se habla de cuenca, se habla de la cuenca total en donde se usa como el punto de terminación de la cuenca, el punto donde la red de drenaje entra al mar o un río principal. Mientras la subcuenca está determinada por puntos donde se unen ríos o puntos como presas, tomas de agua, etc. La cuenca puede ser formada por varias subcuencas y esto depende de la definición del punto de interés o estudio.

6.4.4 Microcuenca.

Para la Unidad de Normas y Regulaciones MAGA-UNR (2000), Este es un término usado para definir subcuenca que generalmente no excede un tamaño determinado. El tamaño puede estar definido por la capacidad institucional de manejar un área.

Sin embargo, la determinación de los límites de la microcuenca está basada en términos técnicos, usando las tomas de agua para sistemas de riego, como puntos de referencia. La microcuenca usualmente se determina bajo el concepto de la cuenca hidrográfica.

6.4.5 Cuenca Hidrogeológica o Hidrológica.

Comprende el drenaje superficial y la percolación del agua subterránea. La determinación de la cuenca hidrogeológica está basada en criterios como la topografía y la geología.

6.4.6 Línea Divisoria o Parte Aguas:

Es la línea divisoria entre cuencas, subcuencas o microcuencas y no es más que los límites determinados por las partes más altas del área y separan la dirección del flujo de la escorrentía superficial. Esta definición aplica a cuencas hidrográficas, ya que para las cuencas hidrogeológicas la zona o área llamada el parte aguas, está determinado por las formaciones geológicas.

6.4.7 La Cuenca como un Sistema:

Para Ramakrishna (1997), la cuenca es como un sistema, la cual es conformada por componentes biofísicos (agua, suelo, etc.) biológicos (flora, fauna) y antropocéntricos (socioeconómicos, culturales, institucionales), que están todos interrelacionados y en equilibrio entre sí, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance

que pone en peligro todo el sistema. Los recursos naturales (agua, suelo, biodiversidad) de la cuenca son renovables si pueden reemplazarse por vía natural o mediante la intervención humana; por el contrario, no son renovables cuando no se les puede reemplazar en un período de tiempo significativo, en términos de las actividades humanas a que están sometidos.

Para Cabrera (1988), los principales problemas derivados por la acción del hombre en las cuencas hidrográficas por el mal manejo de los recursos naturales son: a) Erosión y pérdida de suelos b) Erosión y Compactación c) Desequilibrio en el régimen hídrico d) Sedimentación e) Deforestación, f) Pérdida del patrimonio natural y g) Problemas sociales. Lo anterior es importante puesto que la identificación de los problemas ayuda a definir las causas y los efectos, esto como base para plantear las estrategias operativas a nivel de proyectos, las cuales deben ser económicamente viables y socialmente aceptables. En general, todos los componentes deben verse y tratarse de manera conjunta, puesto que la cuenca es un sistema dinámico y complejo.

La cuenca hidrográfica es un sistema constituido por el ambiente físico y los organismos vivos existentes e interrelacionados entre sí. La cuenca hidrográfica puede estar compuesta por uno o más sistemas. También es necesario tener presente la existencia y la interrelación de otros subsistemas como por ejemplo el subsistema social, el subsistema demográfico y el subsistema económico.

6.4.8 Sistema de clasificación de cuencas

Diversos criterios se manejan en cuanto a las dimensiones que deben tener las cuencas. Campos, (1992) propone la clasificación de cuencas siguiente con base en su magnitud:

Tabla 1. Clasificación de cuencas según su tamaño

Tamaño de la Cuenca (Km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2500	Intermedia – grande
2500 a 5000	Grande
>5000	Muy grande

Fuente: (Campos 1992)

6.5 Características Morfológicas de la Cuenca

Los parámetros Morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control.

El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo. A continuación se describen los parámetros físicos y de relieve que forman las características morfológicas de la cuenca:

6.6 Parámetros físicos

6.6.1 Área o magnitud de la cuenca, (A_c)

Es el área plana en proyección horizontal, encerrada por su divisoria o parte-aguas (diferente a superficie). Usualmente el área es determinada con un planímetro y se reporta en kilómetros cuadrados, excepto para las cuencas pequeñas las cuales se expresan en hectáreas.

Las investigaciones hidrológicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia significativa entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control. En cambio para grandes cuencas el efecto del almacenamiento en el cauce llega a ser pronunciado y habrá que darle más atención a la hidrología de la corriente principal (Chow, 1962).

6.6.2 Perímetro de la cuenca (P)

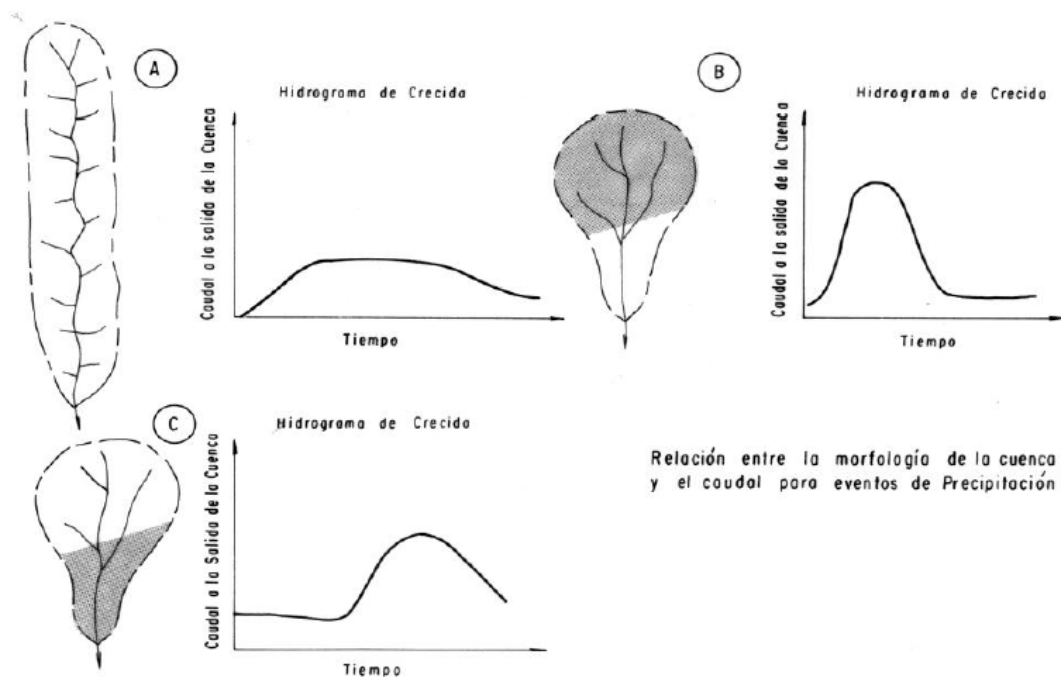
Es la medición lineal del parte-aguas de la cuenca y se expresa en **km**. Usualmente se mide con la utilización de un curvímetro, el cual contiene una rueda giratoria graduada en **cm**, mismos que se multiplican por el factor de conversión de la escala utilizada. Longitud de la cuenca (L_c)

Es la longitud medida desde la salida de la cuenca hasta el límite de la divisoria paralela al cauce principal, a lo largo de una línea recta, se expresa en **km**.

6.6.3 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca afecta las características de la descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo. En general, los escurrimientos de una cuenca de forma casi circular serán diferentes a los de otra, estrecha y alargada, de la misma área (Strahle, 1964).

Figura 3. Ilustración del efecto de la forma de la cuenca en el tiempo de concentración.



Fuente: Bell (1999).

Para evaluar la forma de una cuenca se usan algunos índices que dan una idea numérica de esta.

6.6.4 Índice de Horton (R_f)

Horton, (1932) sugirió un factor adimensional de forma, R_f , como **índice de la forma** de una cuenca según la ecuación:

$$R_f = A_c / L_c^2$$

Donde: R_f = Índice de Forma

A_c = área de la cuenca

L_c = longitud de la cuenca

Este índice ha sido usado extensamente como indicadores de la forma del hidrograma unitario. El valor resultante solo da idea, qué tan cerca o lejos se está de la forma del círculo, cuyo valor

$$Rf = 0.79 (\pi / 4).$$

6.6.5 Índice Gravelius o Compacidad (IC)

H. Gravelius definió el llamado coeficiente de compacidad (C_c) como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo (P_c) con área igual al tamaño (A_c) de la cuenca en km^2 , es decir:

$$C_c = P / P_c = 0.282P / \sqrt{A_c}$$

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando entonces que la cuenca es circular y conforme su valor crece indicará una mayor distorsión en su forma, es decir, se vuelve alargada o asimétrica.

Valores cercanos a 1 indican que las cuencas tienden a una forma circular y con mayor facilidad para concentrar la escorrentía. Sin embargo, las cuencas alargadas presentan alta peligrosidad a las crecidas cuando la tormenta se mueve en la dirección aguas abajo. La superficie de la cuenca nos ofrece una idea de la magnitud de la misma. Así, en las cuencas ovaladas, las aguas circulan por más cauces secundarios y su tiempo de concentración (tiempo que tarda la gota más alejada de la sección de salida en llegar hasta dicha sección) será mayor que en las cuencas alargadas, en las cuales las gotas de agua llegan.

6.6.6 Relación de elongación (R_e)

S.A. Schumm propuso la denominada relación de elongación (R_e), definida como el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo de la misma área de la cuenca (A_c) y la misma longitud de la cuenca (L_c), (Ward, 1975). Entonces:

$$R_e = D / L_c = 1.1284 \sqrt{A_c} / L_c$$

6.7 Características de la red de drenaje

La red de drenaje es el sistema de cauces o corrientes por el que fluyen los escurrimientos superficiales, sub superficiales y subterráneos, de manera temporal o permanente. Su importancia se manifiesta por sus efectos en la formación y rapidez de drenado de los

escurrimientos normales o extraordinarios, además de proporcionar indicios sobre las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca.

Los parámetros físicos relacionados con la red de drenaje de la cuenca hidrográfica, se define como red hidrográfica o red de drenaje al camino natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos.

6.7.1 Tipos de corrientes

Comúnmente se clasifican en tres tipos: perennes, intermitentes y efímeras, con base en la constancia de su escurrimiento o flujo.

Las corrientes perennes

Conducen agua todo el tiempo, excepto durante las sequías extremas.

Corrientes intermitentes

Llevan agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en épocas de lluvias, y por último.

Corrientes efímeras

Sólo conducen agua durante las lluvias o inmediatamente después de éstas (Linsley *et. al.*, 1977).

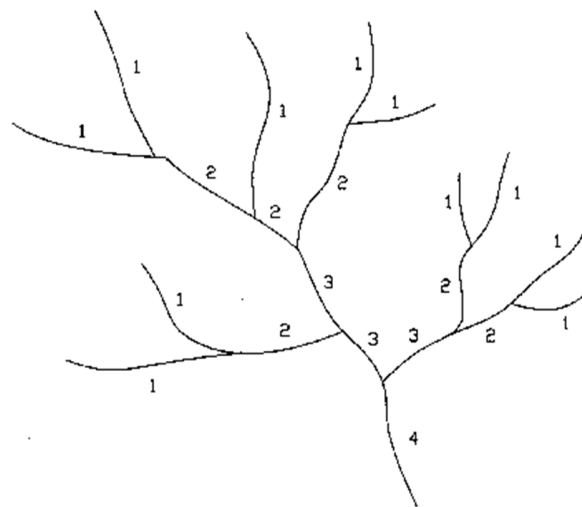
6.7.2 Número de orden de cauce (u) y colector principal

El orden de cauce es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca (Linsley *et. al.*, 1977) Horton (1945), sugirió la clasificación de cauces de acuerdo al número de orden de un río (u) como una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica.

Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones, **un río de segundo orden** es un que posee únicamente ramificaciones de primer orden, **un río de tercer orden** es uno que posee solamente ramificaciones de primero y segundo orden; **un río de cuarto orden** es uno que contiene únicamente ramificaciones de primero, segundo y tercer orden, y así sucesivamente. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

Entonces el orden de la corriente o colector principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca. Al respecto, la determinación del cauce principal, se lleva a cabo del punto de salida de la cuenca hacia aguas arriba, siguiendo a la corriente de más alto orden, hasta alcanzar una bifurcación de dos corrientes de igual orden, entonces, la rama o cauce que tenga una mayor área de cuenca es seleccionado; a partir de tal punto el proceso se repite hasta terminar en un tributario de orden uno (Strahler, 1964).

Figura 4. Número de orden de corrientes según Horton



Fuente: (Horton R. E., 1945)

6.7.3 Relación de bifurcación (R_b)

Horton también introdujo éste concepto para definir el cociente entre el **número de cauces** de cualquier orden (**Nu**) y el número de cauce de orden (**u**) del siguiente orden superior, es decir:

$$R_b = Nu / Nu + 1$$

Donde: R_b = relación de bifurcación

Nu = número total de cauces con orden U

U = número de orden de cauce

Las relaciones de bifurcación varían de 3.0 a 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje. En condiciones naturales y en general, el

valor promedio es 3.5. D. R. Coates encontró que la Rb de corrientes de primero a segundo orden varía de 4.0 a 5.1 y de las de segundo a tercer orden varía de 2.8 a 4.9.

Longitud de cauces (L)

Es la medición lineal de la longitud total de cauces (**L**) expresada en km. Para el caso del colector principal, se considera desde la salida de la cuenca hasta su cabecera principal, el resto se mide desde la cabecera hasta su descarga. El resultado de éste valor se utiliza para definir la densidad de drenaje en una cuenca hidrográfica.

Densidad de drenaje (D_d)

Se define como la longitud total de los cauces (**L**) dentro de la cuenca, dividida entre el área total de drenaje (A_c). Se expresa mediante la relación:

$$D_d = L/A_c$$

Por lo común se encuentran bajas densidades de drenaje en regiones de rocas resistentes o de suelos muy permeables con vegetación densa y donde el relieve es débil. En cambio, se obtienen altas densidades de drenaje en áreas de rocas débiles o de suelos impermeables, vegetación escasa y relieve montañoso (Strahler, 1964).

La densidad de corriente (D_c)

Se define mediante la relación del **número total de cauces (N_u)**, independiente del número de orden de cauce (**u**), entre el **área de la cuenca (A_c)**, o sea:

$$D_c = N_u/A_c$$

A continuación se presenta las relaciones de la densidad de drenaje y la producción de sedimentos de una cuenca hidrográfica.

6.7.4 Parámetros de relieve

Pendiente media de la cuenca

Tiene una importante pero compleja relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces. Es uno de los factores físicos que controlan el tiempo del flujo sobre el terreno y tiene influencia directa en la magnitud de las avenidas o crecidas (Wisler and Brater, 1959).

Para su estimación se presentan dos criterios, el criterio de Alvord y el de Horton: Criterio de Alvord Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Sc = Dn \cdot Lb / Ac$$

Donde:

Sc = pendiente media de la cuenca (Adimensional)

Lb = longitud total de curvas de nivel dentro de la cuenca, en km

Dn = desnivel constante entre curvas de nivel, en km

Ac = área de la cuenca, en km²

Con el objeto de obtener resultados confiables, se recomienda utilizar intervalos entre curvas de nivel de 30 a 150 metros en cuencas grandes o de fuerte pendiente y del orden de 5 a 15 metros en el caso de cuencas pequeñas o de topografía plana. *Criterio de Horton* El primer paso de éste criterio es el establecimiento de una malla de cuadrados sobre el plano de la cuenca, la cual conviene orientar en el sentido del cauce principal (Springall, 1970). Si la cuenca es de 250 km² o menor, se requiere por lo menos de cuatro cuadrados por lado, aumentano su número según crezca el tamaño de la cuenca (Linsley et, al., 1949). Enseguida se mide la longitud de cada línea de la malla dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con respecto a las curvas de nivel. La pendiente de la cuenca se evalúa en cada dirección con las ecuaciones.

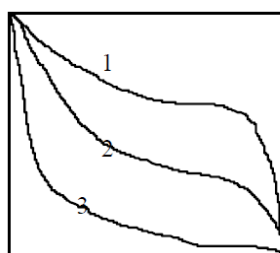
Elevación media de la cuenca

La altura media de la cuenca tiene influencia fundamental en el régimen hidrológico, puesto que la tiene sobre las precipitaciones que alimentan al ciclo hidrológico de la cuenca (Klohn, 1970).

A partir de la **Curva Hipsométrica** se puede determinar fácilmente la denominada elevación mediana de la cuenca (Linsley et. al., 1949), la cual equivale a la cota correspondiente al 50 % del área de la cuenca (figura 7). Es frecuente definir el relieve de una cuenca por medio de ésta curva, la cual representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes (López y Blanco, 1976).

Las curvas hipsométricas reflejan características del ciclo erosivo y del tipo de cuenca, como se observa en la siguiente figura:

Figura 5. Relación del análisis hipsométrico de la cuenca.



- 1.- ETAPA DE DESEQUILIBRIO.
Cuenca geológicamente joven, cuenca de meseta
- 2.- ETAPA DE EQUILIBRIO.
Cuenca geológicamente madura, cuenca de pie de montaña
- 3.- CUENCA EROSIONADA
Cuenca de valle

Fuente: (Strahler, 1964)

La curva hipsométrica o curva de área-elevación se construye determinando con un planímetro el área entre curvas de nivel y representando en una gráfica el área acumulada por encima o por debajo de una cierta elevación, en función de tal cota (Lynsley et. al., 1977).

Pendiente y perfil del cauce principal

Pendiente La pendiente del colector principal se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, en particular con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con la capacidad para el transporte de sedimentos (Klohn, 1970).

Con fines prácticos la pendiente del cauce principal se puede estimar mediante el **criterio simplificado** que consiste en dividir el desnivel del río entre su longitud, esto es:

$$S1 = H / Lp$$

Donde:

S1 = pendiente del cauce principal, adimensional

H = desnivel del río, en m.

Lp = longitud del cauce principal, en m.

De acuerdo al valor anterior de la pendiente, se puede clasificar el relieve o topografía del terreno, según los valores propuestos por Heras (1976), citados en la tabla siguiente:

Tabla 2. Clasificación del terreno de la cuenca según porcentaje de pendiente.

Pendiente (s ₁) (%)	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
>50	Muy Escarpado

Fuente: (Gaspari, 2012)

Cálculo de las pendientes a partir del mapa topográfico

En primer término, se establece una clasificación de pendientes con base en el relieve predominante de la cuenca (pendiente media), obteniendo de cinco a 10 grupos de pendientes uniformes.

Tabla 3. Escala de clasificación según pendiente.

Pendiente media < 10 (%)	Cuencas con Pendiente media < 30 (%)	Cuencas con Pendiente media < 50 (%)
0 – 1.5 - 6	0 - 5	0 - 10
1 - 2.6 - 7	5 - 10	10 - 20
2 - 3.7 - 8	10 - 15	20 - 30
3 - 4.8 - 9	15 - 20	30 - 40
4 - 5.9 - 10	20 - 30	40 – 50

Fuente:(Gaspari, 2012)

Se calcula la distancia entre curvas de nivel o cotas en el plano, para cada pendiente límite de grupo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$da = (e \cdot a) / s$$

Donde:

da = distancia entre líneas isométricas en el plano, en m

e = escala del plano, en m/m

a = diferencia de elevaciones entre curvas de nivel, en m

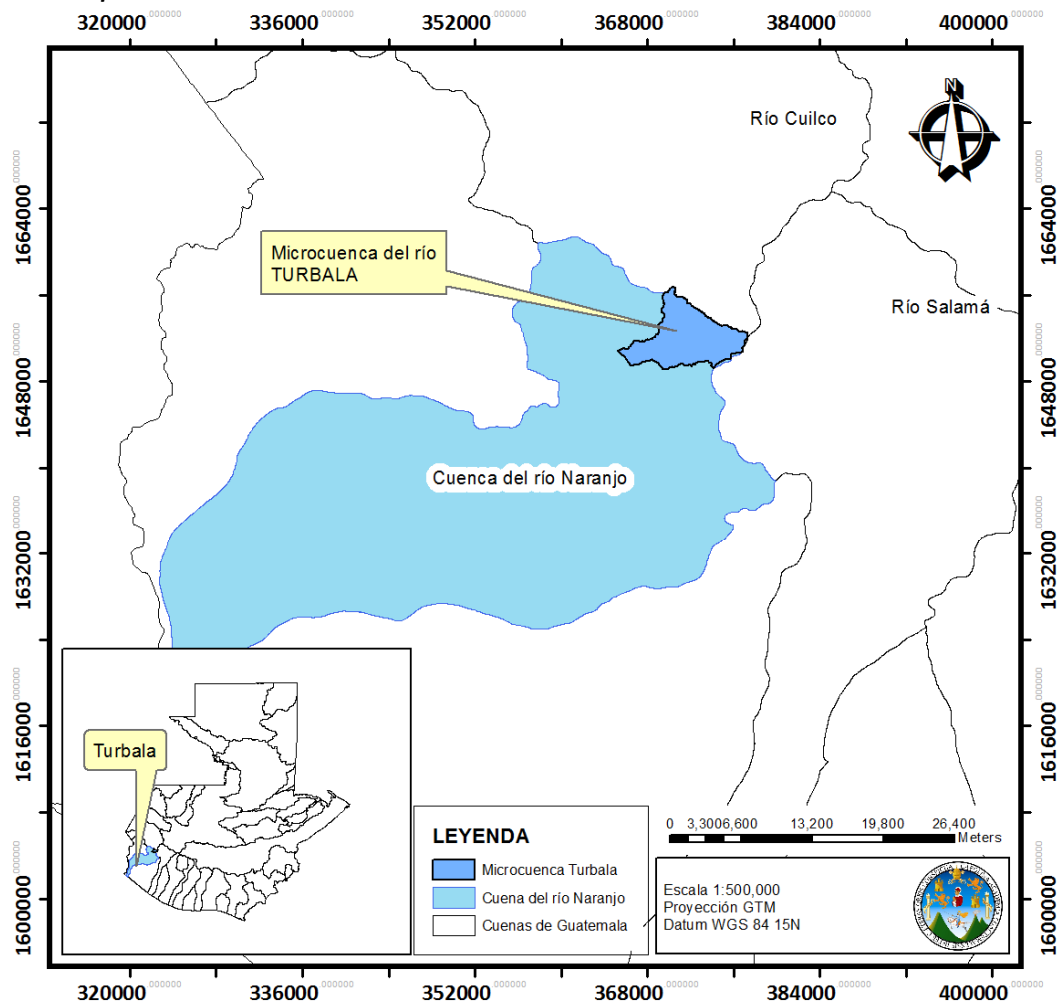
s = pendiente, en m/m.

VII MARCO REFERENCIAL

7.1 Aspectos Generales del área de estudio.

La Microcuenca de Turbala forma parte de la cuenca del río Naranjo de la vertiente del Océano Pacífico y tiene una superficie de 4317.67 hectáreas [43.17 km²], equivalente al 3.4% del área total de la cuenca del río Naranjo. La microcuenca se ubica entre el meridiano 90° longitud Oeste y el paralelo 14° latitud Norte. Se encuentra localizada en las hojas cartográficas escala 1:50,000 del IGN, denominadas: San Marcos, 1860 IV; Quetzaltenango, 1860 I, las coordenadas del cuadrante geográfico de Guatemala Transverse Mercator (GTM) son: X 371387 y Y 1652466.

Figura 6. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Turbala.



Fuente: Elaboración propia 2016.

7.2 Zonas de Vida

En la microcuenca se encuentra definido 1 piso altitudinal con relieves y condiciones climáticas diferentes, que marcan la delimitación de la zona de vida, según de la Cruz (1984), basado en el sistema Holdridge que es: Bosque muy Húmedo Montano Subtropical. (bmh-M). Toda la microcuenca es parte de esta zona de vida, la topografía es ondulada y las especies indicadoras son: Pino blanco (*Pinus ayacahuite*) y Encinos (*Quercus spp.*) La precipitación estimada es de 2,500 mm. anuales, con una bio temperatura de 11°C. De acuerdo al diagrama de Holdridge la evapotranspiración potencial puede estimarse en 0.30.

7.3 Clima

Según la clasificación climática de Thornthwaite, en la microcuenca de Turbalá se presenta el clima húmedo, mesotérmico y con temperaturas semi frío – BB´3. Estas características climáticas en la microcuenca pueden observarse que el clima BB´3 comprende el área total de la microcuenca de Turbala, pues presenta un clima semi frío en donde puede observarse el cultivo de hortalizas, característico de esta zona.

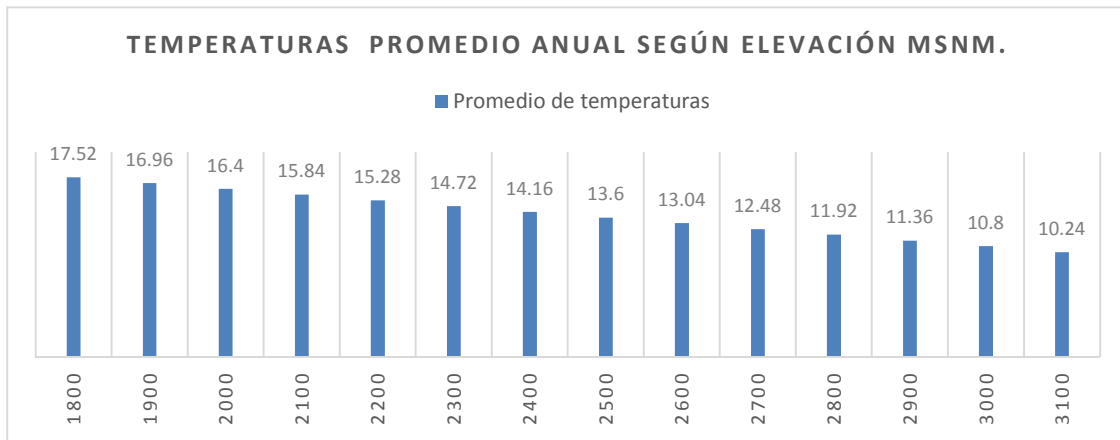
7.4 Régimen de Lluvias

La distribución de la lluvia durante el año está caracterizada por una época seca que se extiende desde Noviembre hasta Marzo. La temporada de lluvias se inicia en promedio en Abril y concluye en Octubre. Durante la época de lluvias se registran dos picos de lluvia máxima, que en promedio suceden durante Junio y luego en Septiembre. El promedio de precipitación para la parte alta de la cuenca del río Naranjo que es donde se encuentra ubicada la microcuenca del río Turbala es de 1298 mm anuales, según datos estación meteorológica San Marcos.

7.5 Temperatura

La temperatura media anual (TMA) en la microcuenca varía en función de la elevación. Esta se basa en registros de temperatura mensual de 15 estaciones de la región suroccidental de Guatemala, dado como resultados para la microcuenca Turbala los siguientes datos:

Gráfica 1. Promedio de temperaturas medias anuales para la microcuenca Turbala.

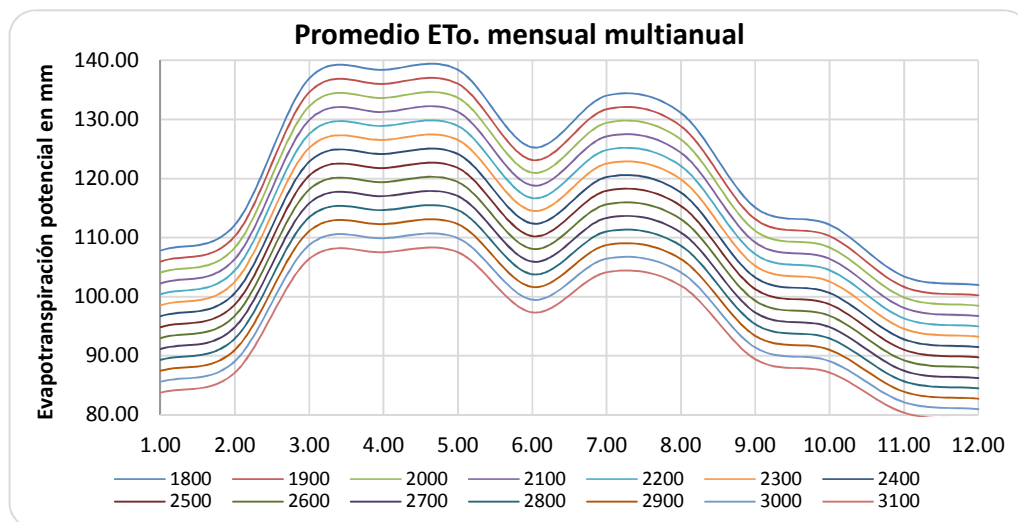


Elaboración propia 2016¹.

7.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial (ETP) del área se estima en función de la ETP calculada mediante la fórmula de **HARGREAVES**, donde $ETP = 1,882 - 0.25 E$, y conociendo la elevación del sitio o la elevación media del área tributaria se desarrolla de la siguiente forma.

Gráfica 2 Promedio de Evapotranspiración mensual multianual de la microcuenca Turbala.



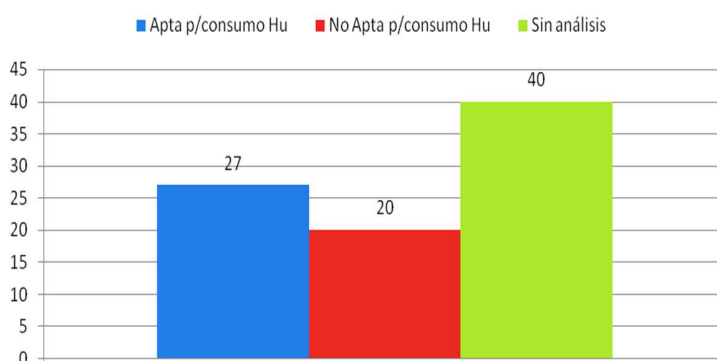
Elaboración propia 2016².

^{1, 2} Nota: Para el cálculo de las temperaturas medias anuales y evapotranspiración potencial en mm, fueron en base a las fórmulas encontradas en el Estudio hidrológico de la cuenca del río Naranjo (Fuentes, 2007)

7.7 Fuentes de agua en la microcuenca

Según la organización de comunidades asociadas por el agua, el medio ambiente y la infraestructura de la cuenca del río Naranjo –CADISNA- inventarió en el año 2008, *ochenta y siete* fuentes de agua, 40 de ellas no cuentan con análisis de potabilidad correspondiente al 54%; de las 47 restantes si cuentan con análisis de potabilidad, de estas el 31% (27) son aptas para consumo humano y el 23% (20) no son aptas para el consumo humano.

Gráfica 3 Fuentes de agua Inventariadas



Fuente: (MANCUERNA, 2011) - CADISNA 2008.

7.8 Aspectos Socioeconómicos

7.8.1 Población

Según estudios proyecciones del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2010) la población de la microcuenca Turbala asciende a 31,824 habitantes en la microcuenca Túrballa, de las cuales el 18.88% de la población corresponde al área urbana y el 88.12% corresponde al área rural. Del total de la población el 50.79% son hombres y 49.21% mujeres. La distribución de la población por edad indican que el 36.27% es menor de 12 años, el 58.28% de los habitantes se encuentra entre los 12 a 59 años de edad y el 5.45% de los habitantes cuenta con más de 60 años. De acuerdo a datos proporcionados por la dirección del Centro de Salud del municipio de Palestina de los Altos, la tasa de crecimiento poblacional en el año 2007 fue de 2.59%, para la microcuenca. La población económicamente activa es del 42.40% de los habitantes (aquellos comprendidos entre los 18 a 59 años), considerada apta para desarrollar cualquier tipo de trabajo.

En relación a género, la Población Económicamente Activa está representada en un 80.16% por hombres, en tanto que el 19.84% es representado por mujeres (MANCUERNA, 2011)

7.8.2 Comunidades de la microcuenca.

Tabla 4. Comunidades de la microcuenca Turbala

COMUNIDADES DE LA MICROCUENCA TURBALA (INE 2010)				
No.	DEPARTAMEN	MUNICIPIO	POBLADO	CATEGORIA
1	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	SANTA IRENE	ALDEA
2	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	SAN MIGUEL DE LOS ALTOS	ALDEA
3	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	TIERRA NEGRA	CASERIO
4	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	SAN JOSE GRANADOS	ALDEA
5	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	SANTA ROSA DE LIMA	FINCA
6	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	SAN RAFAEL SACATEPEQUEZ	ALDEA
7	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	LAS BARRANCAS	ALDEA
8	SAN MARCOS	SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ	CANCHEGUA	CASERIO
9	SAN MARCOS	SAN PEDRO SACATEPEQUEZ	SAN VICENTE ESQUIPULAS	CASERIO
10	SAN MARCOS	SAN PEDRO SACATEPEQUEZ	CHICHICASTE	CASERIO
11	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS LAURELES	CASERIO
12	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	EL DESIERTO	CASERIO
13	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	ROBLE GRANDE	CASERIO
14	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS VASQUEZ O LOS GONZALEZ	CASERIO
15	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	EL SOCORRO	CASERIO
16	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	ALTAMIRA	CASERIO
17	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	SAN ISIDRO O LOS DIAZ	CASERIO
18	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS CABRERA O MOLINOS LOS CABRERA	CASERIO
19	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS MARROQUINES	CASERIO
20	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	EL CARMEN	ALDEA
21	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	TOJPIC	CASERIO
22	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	EL CARMEN II	CASERIO
23	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LA CUMBRE DE SAN JOSE B.V.	CASERIO
24	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS ALONZO	CASERIO
25	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	EL CENTRO DEL EDEN	ALDEA
26	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	CASERIO EL SOCORRO	CASERIO
27	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LOS DIAZ	CASERIO
28	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	LAS ROSAS	CASERIO
29	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	CASERIO PALMIRA	CASERIO
30	QUETZALTENANGO	PALESTINA DE LOS ALTOS	PALESTINA DE LOS ALTOS	PUEBLO

Fuente: (MANCUERNA, 2011)

7.8.3 Etnias:

En la microcuenca de Turbala, el 58.25% de la población es indígena y el 41.75% es no indígena, el 53.74% de la población pertenece a la etnia maya, el 45.84% de la población pertenece a la etnia ladina y el 0.42% a otra etnia, según lo reportado por el Censo de Población realizado por el INE en 2010.

7.8.4 Idiomas

En la microcuenca Turbala, el 53.48% de los habitantes hablan español, en tanto que el 46.52% hablan el Mam.

7.8.5 Tenencia de la tierra

El 100% de la población en las comunidades de la microcuenca Turbalá, son minifundistas, situación esta que se ha desarrollado a lo largo de la historia de Guatemala. La extensión de la finca es de 6-15 cuerdas, terrenos destinados para siembras de cultivos limpios. Alrededor del 96.24% de la tierra es propia, un 2.11% de la tierra es arrendada y un 1.72% de la tierra es prestada.

7.8.6 Sistemas de producción predominantes

Granos básicos (maíz/frijol).

El área sembrada con el cultivo de maíz oscila entre las 7 a 12 cuerdas. Los agricultores que siembran maíz con el objetivo de autoconsumo se aseguran de obtener la suficiente cantidad de producto durante todo el año (32 qq/año/familia de 6 miembros; FAO). En total se siembran aproximadamente 150 hectáreas de maíz anual, dando como promedio 260 toneladas métricas de maíz en monocultivo. El maíz es sembrado en asocio con frijol y haba.

Cultivo de hortalizas.

Las hortalizas han tomado auge como una fuente importante de ingreso económico para las familias del área de la microcuenca Turbala. Las hortalizas más importantes sembradas por los agricultores son: la coliflor, el repollo, el brócoli y la zanahoria y la papa. El cultivo de la papa constituye el rubro número uno de ingreso económico en la mayoría de las familias. Este cultivo es sembrado específicamente para la venta, siendo los restos o producto de mala calidad la destinada para el autoconsumo familiar.

La producción de papa en una cuerda de terreno es de aproximadamente 25 quintales, por lo que representa una fuente de ingreso económico significativo para las familias. En la microcuenca Turbala, se siembran aproximadamente 25 hectáreas con el cultivo de papa, las que producen como promedio de 708.61 Tm de producto.

Sistema pecuario

Las diferentes especies de animales constituyen también una fuente importante de ingreso económico para las familias, cuando se realiza la venta de los animales en pié, ya que en la comunidades no existe persona alguna que se dedique al destace de los animales para lograr el valor agregado de los mismos. Algunos otros ingresos lo constituyen los derivados de los productos: como la leche, queso, huevos y carne, generalmente son vendidos dentro de la comunidad y en las cabeceras municipales de San Pedro Sacatepéquez, Palestina de los Altos y San Antonio Sacatepéquez.

7.8.7 Instituciones y organización comunitaria

En las comunidades de la microcuenca Turbala, los pobladores están organizados especialmente en Comités Comunitarios de Desarrollo (COCODES), quienes son electos de forma libre por el resto de pobladores.

Además existen grupos organizados como la Asociación de Papicultores de Palestina de los Altos, comités de padres de familia como COEDUCAS y grupos organizados en diferentes religiones.

En la microcuenca Turbala intervienen organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, a favor del desarrollo de las comunidades, con las cuales implementan diferentes proyectos.

VIII OBJETIVOS

8.1 GENERAL

Identificar y caracterizar las áreas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Turbala.

8.1.1 ESPECÍFICOS:

- 1). Delimitar las áreas con mayor potencial de recarga hídrica de la microcuenca, para planificación y manejo de sus recursos hídrico – forestal.
- 2). Describir y analizar las principales características de las zonas de recarga hídrica a delimitar, haciendo énfasis en las variables: morfometría, pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo.

IX MATERIALES Y MÉTODOS

9.1 Materiales y Equipo

Materiales de Oficina

Hojas de papel bond de 80gr (5 resmas).
Tinta negra para impresiones (2 cartuchos).
Lapiceros.
Hojas para empastados.
Hojas formato A1 (para mapas).

Materiales de campo:

Boletas de Campo (Clase textural y Pruebas de infiltración).
Bolsas de Papel (para muestras de suelos).
Balde o recipientes de agua de 20 litros cada uno.
Cinta adhesiva.
Marcadores.
Lápiz.
Lapicero.
Libreta de apuntes y observaciones.

Equipo de campo:

Infiltrómetro de doble anillo (anillos de metal)
GPS tipo navegador.
Regla de metal de al menos 30 cm.
Cinta métrica.
Cronómetro o reloj.
Pala y azadón.
Machete.
Mazo de metal.

9.2 Descripción de la metodología

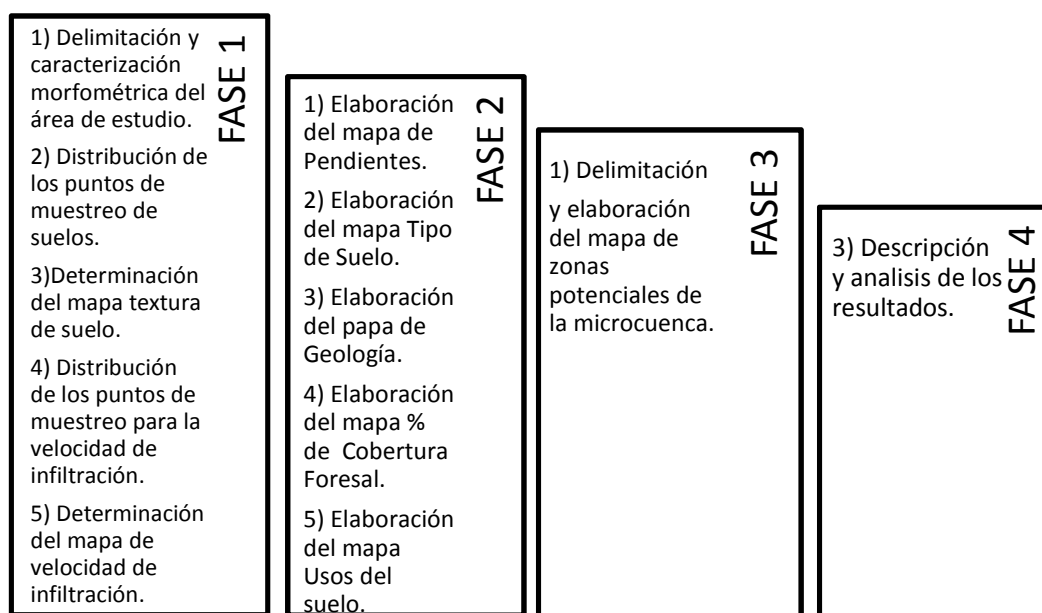
En la presente investigación se adoptaron metodologías aplicadas anteriormente en el tema de recarga hídrica, tales como: la Metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica según (Matus Silva, 2007). Y la metodología implementada en la Determinación de zonas potenciales de recarga hídrica por (García Alvarez, 2009). Estas consideran el tipo y características de la información geográfica disponible y la reducción del número de variables utilizadas (capas temáticas), también consideran, una escala a semi-detalle, y la modificación de las matrices de ponderación para las diferentes variables.

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

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

En base a esta ecuación y los objetivos expuestos anteriormente la metodología está comprendida en las siguientes fases secuenciales.

Figura 7. Fases de la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.



9.3 FASE UNO

La mayor parte de preparación y procesamiento de los datos se llevó a cabo utilizando las herramientas disponibles en el software ArcGis, debido a que todos los pasos expuestos están relacionados con la aplicación de los sistemas de información geográfica.

9.3.1 Delimitación del área de estudio y caracterización morfométrica.

Esta fase consistió en realizar la delimitación natural del área de estudio, la misma se desarrolla a partir de los parámetros de relieve, red de drenaje entre otros, por lo que se consideró oportuno caracterizar morfométricamente la cuenca del río Turbala.

Para la determinación de estos parámetros, se desarrollaron en cuatro fases o categorías, a) parámetros lineales b) parámetros de forma c) parámetros de relieve y d) parámetros de drenaje. Para el cálculo de cada una de las categorías se tomaron en cuenta parte de la metodología aplicada en el atlas temático de cuencas hidrográficas de Guatemala (MAGA, 2004), aplicando cada una de las ecuaciones respectivas según sus autores. La metodología empleada se da a conocer en los siguientes apartados:

Parámetros lineales

En el cálculo de los parámetros lineales consideran los siguientes aspectos área en km² o en hectáreas, y perímetro en km, para obtener dichos parámetros se toma como base el modelo de elevación digital MED, a partir de las curvas a nivel con un cambio de altitud de cada 20 msnm. Generadas por el MAGA 2006 – 2010 que permite delimitar el área de estudio en base a su relieve y red de drenaje.

Parámetros de forma

Los parámetros de forma calculados fueron los siguientes con respecto a sus debidas ecuaciones:

a) Índice de Horton
(R_f) $R_f = A_c / L_c^2$

*Dónde: R_f = Índice de Forma
 A_c = área de la cuenca
 L_c = longitud de la cuenca*

b) índice de Gravelius o Compacidad

$$(Cc) \quad Cc = \frac{P}{Pc} = 0.282 / \sqrt{Ac}$$

Dónde: Cc = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de un círculo

Ac = Área de la cuenca

c) Radio ó Relación de elongación

$$(Re) \quad Re = D/Lc = 1.1284\sqrt{Ac} / Lc$$

Dónde: Re = Relación de elongación o cociente adimensional entre

D = Diámetro de un círculo de la misma área de la cuenca

Lc = Longitud de la cuenca

9.3.1.1 Parámetros de la red de drenaje

Los parámetros de drenaje calculados fueron los siguientes con respecto a sus debidas ecuaciones:

a) Radio o Relación de bifurcación de Horton

$$(Rb) \quad Rb = Nu / Nu + 1$$

Dónde: Rb = Radio de bifurcación

Nu = Número total de caces con orden U

U = Número del orden del cauce

b) Tiempo de concentración.

$$(Tc) \quad Tc = (0.87 L^2 (H/L))^{0.385}$$

L = longitud en Km, del cauce más largo hasta la sección considerada en el estudio

H = diferencia entre 2 elevaciones extremas de la cuenca en metros.

Ajustando la ecuación queda de la siguiente forma asignando $S = H/L$ nos queda:

$$Tc = (0.87 L^2 / S)^{0.385}$$

c) Densidad de drenaje.

$$(Dd) \quad Dd = L/Ac$$

Dónde: Dd = Densidad de drenaje

L = Longitud total de los cauces

Ac = Área total de drenaje (área de la cuenca)

d) Longitud de los cauces

e) Longitud del cauce principal

9.3.1.2 Parámetros de relieve

El cálculo de los parámetros de relieve se desarrolló del modelo de elevación digital MED, a partir de las curvas a nivel con un cambio de altitud de cada 20 msnm para generar el

mapa de pendientes, estos valores se reclasificaron en doce intervalos según (CATIE, 2013) para realizar los cálculos siguientes:

- a) Análisis Hipsométrico
- b) Altitud media
- c) Altitud más frecuente
- d) Pendiente promedio de la cuenca en %

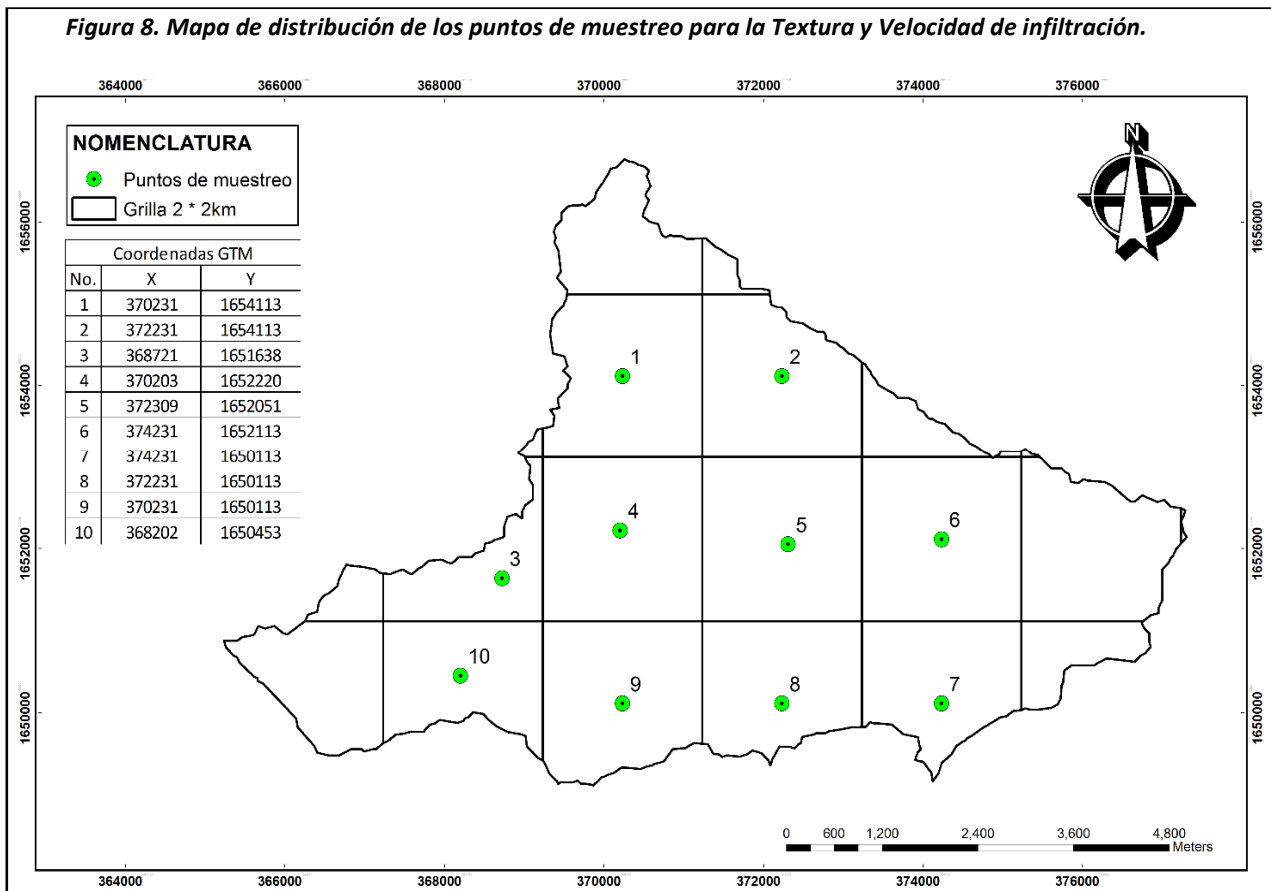
9.3.2 Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos (clase textural y capacidad de infiltración).

Delimitada y calculada el área de estudio, se procedió a la distribución de puntos de muestreo de la textura y la velocidad de infiltración, permitiendo mapear el área de una manera lógica y consistente, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

1. Según (Rossiter, 2004). La intensidad de muestreo para un nivel medio de “semi detalle”, requiere de efectuar transectos de 1 a 2 km de ancho que atraviesen una secuencia de unidades homogéneas.
2. El (INAB., 2003), (Illescas, 1974) y (MAGA) estipulan que existe una estrecha relación entre el tipo de suelos, la textura y la velocidad de infiltración.
3. También se consideraron ciertos criterios de los asesores de adicionar las capas de geología y cobertura forestal generados por el (MAGA) para que existieran puntos de muestreo tanto en áreas con cobertura y en las dos categorías geológicas que corren en la microcuenca.

Por consiguiente, los intervalos de muestreo fueron a cada 2 km². Puesto que tampoco existieron fuentes de financiamiento para esta investigación, siendo así que se acordó reducir a un número considerable de puntos de muestreo que fuesen concisos y homogéneos; la distribución se presenta a continuación.

Figura 8. Mapa de distribución de los puntos de muestreo para la Textura y Velocidad de infiltración.



Fuente: Elaboración propia 2016².

A nivel de campo, los diez puntos de muestreo tanto para determinar la textura como velocidad de infiltración en el suelo se ubicaron utilizando un sistema GPS tipo navegador.

9.3.3 Determinación del mapa de texturas del área de estudio

Una vez ubicados y georreferenciados los puntos de muestreo, se procedió a la fase de campo que consistió en los siguientes pasos.

² Nota: Todos los mapas resultantes carecen de escala puesto que todos fueron elaborados a formato A1 estos se imprimirán a su respectiva escala y también se adjuntarán digitalmente.

- a) Limpieza del área, eliminando maleza u hojarasca depositadas sobre el suelo.
- b) Luego se hizo un agujero en forma de “V” del ancho de la pala de 15 a 20 a centímetros de profundidad.
- c) Con la pala, cortamos una porción de 2 a 3 centímetros de espesor de la pared del agujero, cada muestra de suelo debía incluir tierra de toda la profundidad del muestreo.
- d) seguidamente se etiqueto la muestra para su posterior envío al laboratorio.

Luego de haber hecho la recolección de muestras de suelos, estas se enviaron al laboratorio de diagnóstico fitosanitario Área de Suelos del MAGA Quetzaltenango.

9.3.4 Distribución de los puntos de muestreo de la velocidad de Infiltración.

Para la presente investigación se realizaron las pruebas de velocidad de infiltración en base al mismo número de muestras de suelo que están enarcadas en el mapa de distribución de puntos de muestreo.

Para las pruebas de infiltración se utilizó el método del **Infiltrómetro de doble anillo o Anillos de Munz** (Universidad Politécnica de Valencia, 2010). El cual consistió en las siguientes fases y consideraciones:

9.3.4.1 Consideraciones previas

- a) Ubicar un lugar que fuese representativo del suelo a estudiar.
- b) Evitar ubicar los anillos en zonas compactadas. Los terrenos compactados por vehículos o personas presentan una tasa de infiltración menor que las zonas adyacentes (sobre todo en los suelos de textura fina).
- c) No instalar los anillos sobre las grietas de expansión-contracción, o en suelos demasiados ricos en arcillas.
- d) La tasa de infiltración es particular para cada horizonte del suelo, asumiéndose homogénea en todo el espesor del mismo. En suelos con varios horizontes de características diferentes, el paso del frente húmedo de un horizonte a otro quedará reflejado en la tasa de infiltración medida con el Infiltrómetro.

9.3.4.2 Colocación del Instrumento Infiltrómetro de doble anillo

Es muy importante realizar las operaciones sin alterar o perturbar la porosidad del suelo, puesto que los factores determinantes de la capacidad de absorción de los suelos son múltiples y fáciles de modificar, por consiguiente.

- a) Se colocaron los anillos sobre el área elegida comprobando que no quedaran piedras o raíces bajo el filo de ninguno de los ellos, esto para evitar fugas de agua indeseadas.
- b) Se hincaron los anillos con un mazo o martillo de golpe, los anillos se hundieron como mínimo 3 cm.

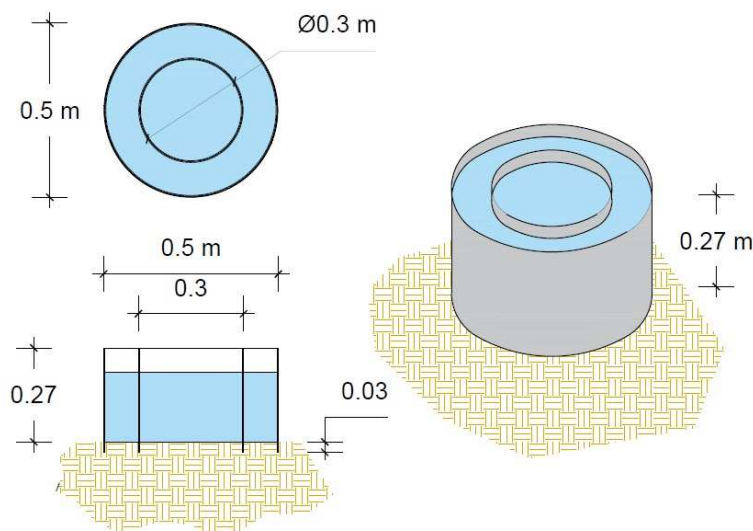
9.3.4.3 Llenado de agua

- a) Clavados los anillos comenzamos a llenar cuidadosamente de agua ambos anillos, empezando por el exterior. Resultó conveniente “tapizar” el suelo de al menos, el anillo central con arena gruesa, grava o algún tipo de maleza, de esta forma evitamos que el impacto directo del agua sobre el suelo desnudo provocara la desagregación de las partículas y el sellado de los poros.
- b) Luego comprobamos que no existieran fugas de agua provocadas por la presencia de piedras o raicillas alrededor para posterior mente empezar con la toma de lecturas.

9.3.4.4 Toma de datos.

- a) Las lecturas de velocidad de infiltración se tomaron en intervalos constantes de tiempo primeramente en intervalos de 1min, luego de 2 min 3 y 5 min respectivamente; estos intervalos difirieron del tipo de textura de los suelos o la saturación de los mismos.
- b) Una vez alcanzada una tasa de infiltración constante continuamos con las medidas hasta tener la absoluta certeza de que el agua estaba circulando por un mismo horizonte para luego obtener un promedio de estos datos constantes.

Figura 9. Esquema del establecimiento del Infiltrómetro de doble cilindro o Anillos de Munz en campo.



Elaboración propia, en base al esquema de la Universidad Politécnica de Valencia, 2010.

9.3.5 Elaboración del mapa de velocidad de infiltración.

Luego de haber obtenido los resultados a nivel de campo de la velocidad de infiltración se procedió a su tabulación y cálculo de la tasa de infiltración para ello tomamos como base el principio expuesto en la investigación desarrollada por (Matus Silva, 2007) donde se toman los últimos tres datos constantes y se obtiene un promedio de los mismos. Para el caso de esta investigación, obtuvimos la tasa de infiltración a partir de obtener por lo menos diez datos constantes.

A partir de estos resultados se elaboró el mapa de velocidad de infiltración. Así que tanto el mapa de Texturas de suelo con Velocidad de infiltración fueron base para la elaboración del mapa **Tipo de suelo**. Que se explicara su elaboración más adelante.

9.4 FASE DOS

Después de haber sistematizado y analizado los datos de campo se procedió a la creación de los mapas base con la ayuda de las herramientas del software ArcGis, estos dieron pauta a la identificación y delimitación de las zonas potenciales de recarga hídrica del área de estudio, tomando como principio el procesamiento de la información a modelo RASTER y álgebra de mapas.

9.4.1 Elaboración del mapa de pendientes.

El mapa de pendientes se obtuvo mediante la generación del modelo de elevación digital (MED) a partir de las curvas a nivel con un cambio de altitud de cada 20 msnm generado por el MAGA en el 2010, los resultados se reclasificaron y ponderaron en base a la siguiente matriz.

Tabla 5. Matriz para la clasificación y ponderación de pendientes, según la ecuación para la determinación de las zonas de recarga hídrica.

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

Fuente: (Matus Silva, 2007)

Como producto de aplicar la matriz de ponderación de la tabla anterior, obtuvimos: a) el mapa de pendientes clasificado según los rangos establecidos, y b) el mapa raster de pendientes ponderadas; El cual aporó los valores para la aplicación de la ecuación de Recarga Hídrica.

9.4.2 Elaboración del mapa tipo de suelo

Para el mapa **Tipo de suelo** partimos de que este hace referencia a dos importantes características que intervienen en la recarga hídrica, éstas son: **la textura del suelo y la velocidad de infiltración**. Por consiguiente creamos los mapas de estas dos categorías, partiendo de los resultados de laboratorio y los datos obtenidos de las diez pruebas de infiltración; seguidamente se ponderaron como se explica a continuación.

9.4.2.1 Mapa de texturas de suelo

Los datos de laboratorio, de las diez muestras recolectadas en campo, se compararon y analizaron en su conjunto luego se ponderaron de acuerdo a la siguiente matriz.

Tabla 6. Matriz para la clasificación y ponderación de texturas del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

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

Fuente: (Matus Silva, 2007)

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

9.4.2.2 Mapa de velocidad de infiltración

Después de obtener los datos a nivel de campo de la variable velocidad de infiltración del suelo, se calcularon tomando como referencia la metodología expuesta en la investigación desarrollada por (Matus Silva, 2007) que considera lo siguiente:

La capacidad de infiltración se obtiene del cociente entre la cantidad de agua infiltrada y el intervalo de tiempo; $I = \text{Variación de altura} / \text{Variación de tiempo}$. Un ejemplo para determinar la velocidad de infiltración de los suelos se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Cálculo de la velocidad de Infiltración

No.	Minutos entre lecturas	Tiempo acumulado en Minutos	Lectura en centímetros	Diferencia entre lecturas (cm)	Infiltración cm/hora
48	5	134	14.6	1	12
49	5	139	13.6	1	12
50	5	144	12.7	0.9	10.8
51	5	149	11.7	1	12
52	5	154	10.7	1	12
53	5	159	9.8	0.9	10.8
54	5	164	8.9	0.9	10.8
55	5	169	8	0.9	10.8
56	5	174	7.1	0.9	10.8
Promedio o tasa de infiltración					11.33

Elaboración propia 2015

Entonces para determinar la velocidad de infiltración **cm/hora** se emplea la siguiente ecuación.

$$I = \frac{h * 60}{t}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración

h = deferencia de lectura de agua en cm

t = tiempo entre de intervalos en min

Ahora bien para determinar la tasa de infiltración se tomó en cuenta lo siguiente: esta se calcula a partir de una serie de datos un tanto uniformes y se obtiene un promedio.

El resultado obtenido para un determinado punto de muestreo, se generalizo para las áreas adyacentes que se consideraron homogéneas al mismo. Los valores de velocidad de infiltración y sus respectivas áreas de influencia, fueron clasificados en base a la siguiente matriz de ponderación.

Tabla 7. Matriz para la clasificación y ponderación de velocidad de infiltración, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

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

Fuente: adaptación (García Alvarez, 2009)

Una vez obtenidos los mapas ponderados de texturas de suelo y velocidad de infiltración, se procedió a la creación del mapa de Tipo de suelo, basado en los valores dados para la textura y la velocidad de infiltración. Esto se llevó a cabo con las herramientas algebra de mapas en el software ArcGis al determinar el valor promedio mediante la siguiente fórmula:

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

El resultado de este análisis dio cabida al mapa **tipo de suelo**, y sus valores fueron aplicados a la ecuación general, para la determinación de zonas de recarga hídrica.

9.4.3 Elaboración del mapa de geología

Para crear el mapa de geología utilizamos como base el mapa geológico generado por el IGN a escala 1:50000. y actualizado por el MAGA. Las unidades geológicas resultantes se clasificaron según sus características, considerando el nivel de permeabilidad al agua que podrían presentar; la clasificación se hizo en base una matriz de ponderación que se presenta a continuación:

Tabla 8. Matriz para la clasificación y ponderación de la geología de suelos, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

Tipo de Roca	Posibilidad de Recarga	Ponderación	Geología ING 1:50000
Muy permeables, muy suaves	Muy Alta	5	Qal. Tmpa
Permeables suaves	Alta	4	KTi
Moderadamente permeables	Moderada	3	Qp, Tmpb
Poco permeables	Baja	2	Tvmt, Psr
Impermeables	Muy baja	1	Otros
	Ninguna	0	Cuerpos de Agua

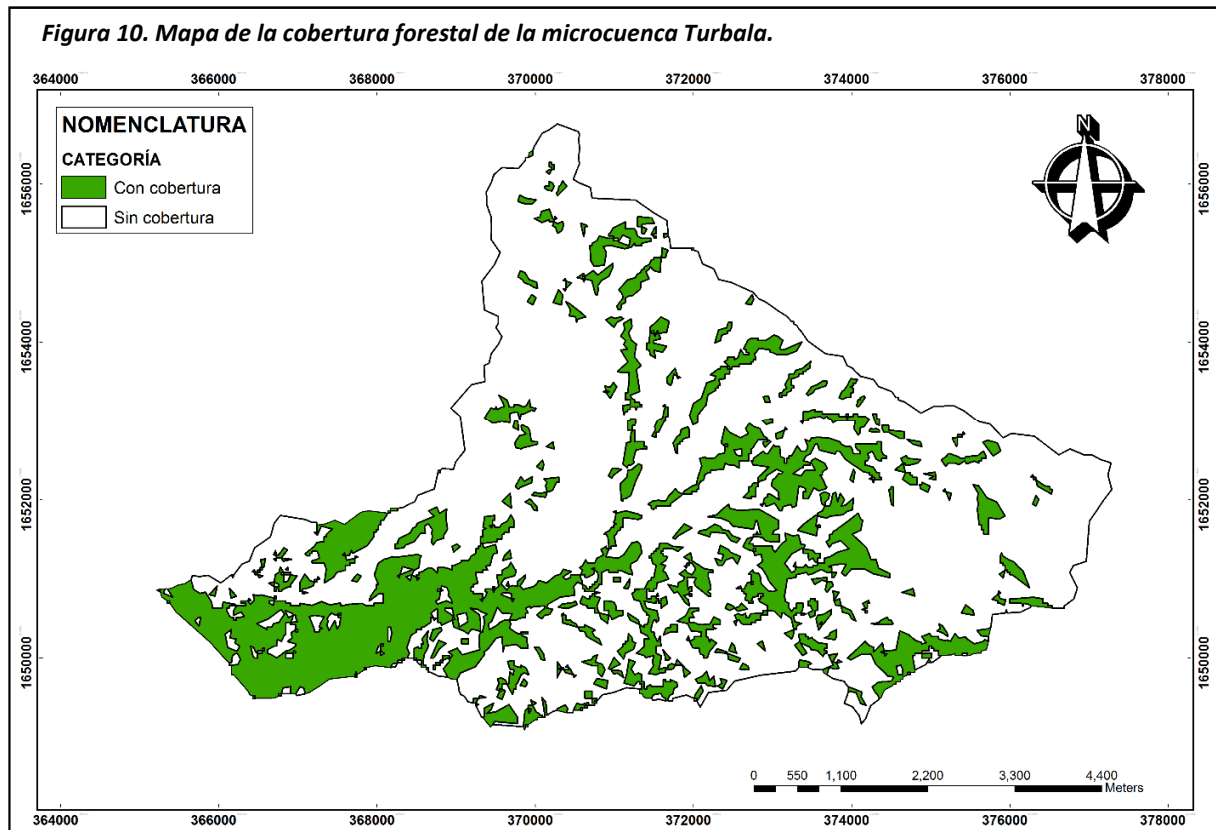
Fuente: Matus Silva, 2007. * Adaptación (García Alvarez, 2009) y consideraciones dadas por INAB (2005).

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

9.4.4 Elaboración del mapa de porcentaje de cobertura forestal

La cobertura forestal para el presente estudio, se refiere al área de suelo cubierta por vegetación permanente, para este caso lo que se considera como vegetación permanente son bosques coníferos, bosques de especies latifoliadas, arbustos y matorrales. Se utilizó el mapa de cobertura forestal y uso de la tierra, actualizado al 2010 por el Instituto Nacional de Bosques INAB.

El porcentaje de cobertura se obtuvo mediante la generación de unidades de mapeo uniformes en toda la cuenca, tomando en cuenta nuevamente los criterios de (Rossiter, 2004) que para un muestreo a semi detalle se trazan transectos de 1 a 2 km; por lo que para ser más concisos optamos por generar un mapa con su respectiva grilla a cada Km² este se muestra a continuación.



Fuente: Elaboración propia 2015, datos a partir del mapa de cobertura forestal INAB 2010.

Luego a todas las unidades de muestreo se les calculó el porcentaje de cobertura mediante la siguiente fórmula:

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

Los resultados se ponderaron en base a la siguiente matriz:

Tabla 9. Matriz para la clasificación y ponderación del porcentaje de cobertura del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

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

Fuente: (Matus Silva, 2007)

De la aplicación de la matriz de ponderación de la tabla anterior, del porcentaje de cobertura, se obtuvo a) el mapa de porcentaje de cobertura vegetal b) el mapa raster con los valores ponderados necesarios para la aplicación de la ecuación general de zonas de recarga hídrica.

9.4.5 Elaboración del mapa de uso del suelo

Para generar el mapa raster del uso del suelo con los valores ponderados para la ecuación de Matus Silva, partimos de las categorías del mapa Uso de la tierra, generado por el grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la tierra al año 2012, su ponderación fue por medio de la aplicación de la siguiente matriz.

Tabla 10. Matriz para ponderación del uso del suelo, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

Equivalente mapa de cobertura vegetal y uso de la Tierra 2006	Uso del suelo (Matus, 2007)	Posibilidad de Recarga	Ponderación
Plantaciones Forestales Bosques Naturales: Conífero, Latifoliado y Mixto.	Bosques con 3 estratos: Árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Café, cítricos, aguacate, mango, frutales deciduos, banano, otros frutales	Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Granos básicos, mosaico de cultivos con prácticas de conservación de suelos, matorrales.	Terrenos cultivados con obras de conservación de suelos	Moderada	3
Granos básicos, mosaico de cultivos sin prácticas de conservación de suelos.	Terrenos agropecuarios sin obras de conservación de suelos	Baja	2
Hortalizas, melón, sandía, pastos cultivados, pastos naturales.	Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1
Centros poblados, aeropuertos, cementerios, cuerpos de agua, playa/arena	_____	Ninguna	0

Fuente: adaptación (García Alvarez, 2009). Clasificación hecha en base a las categorías de uso presentadas por el MAGA, 2003.

Los resultados obtenidos para cada unidad de mapeo resultante (celda) fueron comparados y reclasificados en base a lo planteado en la tabla 11, estos dieron como resultado el mapa raster con los valores ponderados necesarios para la aplicación de la ecuación general de zonas de recarga hídrica.

9.5 FASE TRES

Una vez, obtenidos todos los valores y su respectiva ponderación para cada uno de las variables, se procedió a la aplicación de la ecuación modificada (es decir a la suma de los valores de todas las capas) utilizando el modelo raster como base para el geo

procesamiento para la determinación del potencial y clasificación de las zonas de recarga hídrica.

9.5.1 Delimitación y generación del mapa de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica, de la microcuenca Turbala.

Para delimitar las zonas de recarga hídrica y su potencial aplicamos la ecuación propuesta por (Matus Silva, 2007).

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

Para ello analizamos en su conjunto los valores de los mapas raster creados anteriormente 1) de pendientes, 2) Tipo de suelo, 3) Geología, 4) Cobertura vegetal, y 5) Uso del suelo; para ello usamos las herramientas de ArcGis y los principios del Algebra de mapas, los resultados obtenidos fueron nuevamente reclasificados en base a los rangos y valores establecidos en la siguiente matriz de ponderación.

Tabla 11. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica, según la ecuación para la determinación de zonas de recarga hídrica.

POSIBILIDAD DE RECARGA	VALORES RESULTANTES
Muy Alta	4.10 - 5.00
Alta	3.50 - 4.09
Moderada	2.60 - 3.49
Baja	2.00 - 2.59
Muy Baja	0.79 - 1.99*

Fuente: (Matus Silva, 2007) * Rango modificado (García Alvarez, 2009). Para incluir la variación de los valores causada por las modificaciones.

De la aplicación de la matriz de ponderación, se obtuvo el mapa de zonas delimitadas y reclasificadas según su potencial de recarga hídrica dentro del área de estudio.

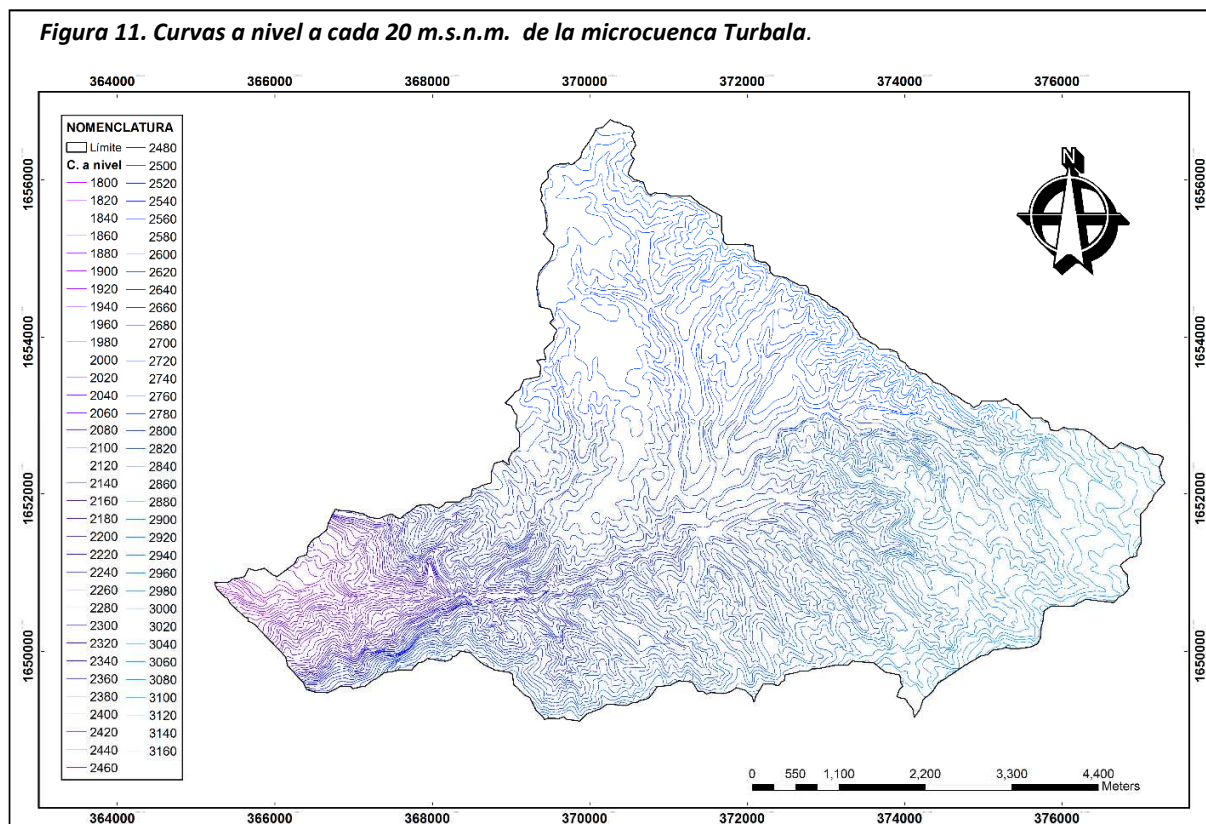
X RESULTADOS

10.1 Delimitación y caracterización morfométrica de la microcuenca del río Turbala

Para el presente estudio se consideró crear el modelo de elevación digital MED a partir de las curvas a nivel con un cambio de altitud a cada veinte metros sobre el nivel del mar (msnm), que nos permite obtener un detalle más minucioso a la hora de analizar espacialmente el territorio como se presenta a continuación.

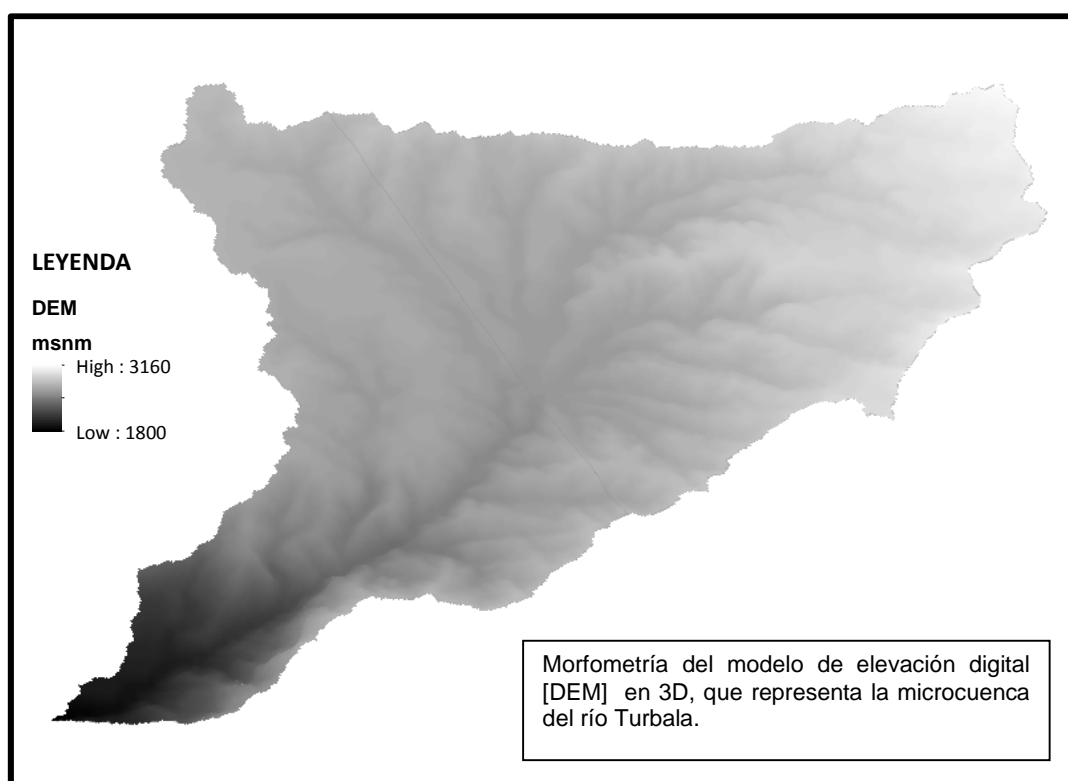
Una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico es la morfometría de cuencas (Campos, 1992, Gregory and Walling, 1985) ya que nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región.

El uso de sistemas de información geográfica (SIG) y el empleo de modelos de elevación digital (MED) para la caracterización de rasgos morfológicos ha sido importante en los últimos años, los cuales se han orientado a la caracterización medioambiental del terreno derivando redes de drenaje de una zona, surgiendo como una alternativa importante para manejar, planear y evaluar los recursos naturales de una cuenca.



Fuente: Elaboración propia 2015.

Figura 12. Modelo de elevación digital (MED), 3D de la microcuenca Turbala.



Fuente: Elaboración propia 2015.

El DEM resultante nos indica que esta es el área de estudio, los demás cálculos morfométricos de la microcuenca Turbala, se obtuvieron en cada categoría respectiva en base a sus fórmulas que se describen y presentan a continuación.

10.1.1 Parámetros lineales.

Estos son dos Área y Perímetro respectivamente, para la microcuenca Turbala con un área de 43.17 km² y un perímetro de 37,34 km. se cataloga como una cuenca pequeña.

Tabla 12. Clasificación de cuencas según su tamaño.

Rangos de áreas	Clases de tamaño
12.5 – 35	Muy pequeña
35.5 – 58	Pequeña
58.5 – 81	Mediana
81.5 – 103 ó >	Grande

Fuente: Campos, A. 1992

10.1.2 Parámetros de Forma.

a) Factor de Forma (Horton)

Uno de los índices más utilizados para medir la forma de la cuenca, es el factor o relación de forma de Horton, el cual intenta relacionar la morfología con los caudales pico de la cuenca valores más cercanos a la unidad implican formas redondas y caudales picos no muy pronunciados lo contrario con cifras alejadas a la unidad. El resultado para la microcuenca Turbala es de $(F) = 0.19$ que implica ser una cuenca muy alargada y una respuesta a crecidas bastante pronunciadas en tiempos cortos.

b) Coeficiente de Compacidad (Cc) o Índice de Gravelius (1914).

El índice obtenido para la microcuenca Turbala es de **(Cc): 1.60** según (Campos A., 1992) es de Clase III de forma Oval - oblonga a rectangular - alargada.

Tabla 13. Formas de la cuenca de acuerdo al Índice de compacidad.

Clase de Forma	Índice de Compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval - Redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 ó más de 2	Oval - oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: Campos 1992.

El Cc, puede ser un indicador para prevenir inundaciones o llegadas repentinas de agua en ciertos poblados cercanos a cauces o arroyos pues la duración de los escurrimientos al cauce principal puede ser más rápido.

c) Razón de Elongación (Re).

Este se evalúo en base a los criterios de (Shumm, 1956). Que es la mejor correlación que guarda con la hidrología de la cuenca, describiendo un aspecto de la organización de la red de drenaje; el valor encontrado fue **(Re): 0.49** que implica que es una cuenca alargada lo que concuerda con el parámetro anterior, los índices más bajos a la unidad, son aquellos que se dan en áreas con relieve y pendientes pronunciadas.

10.1.3 Parámetros de la red de drenaje.

Los resultados de la red de drenaje se presentan en un conjunto de parámetros estos son a) Radio o Relación de bifurcación de Horton (R_b) b) Tiempo de concentración. (T_c) c) Densidad de drenaje. (D_d) d) Longitud de los cauces e) Longitud del cauce principal; Los cuales se describen a continuación.

Cuadro 2. Red hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.

Red de drenaje de la microcuenca Turbala				
No. de Orden	Segmentos	Longitud Acumulada en Km.	Radio de Bifurcación	Tipo de Corrientes
1	458	86.47	2.10	Efímeras
2	218	42.28	1.63	Efímeras
3	134	27.11	2.44	Intermitentes
4	55	12.16	1.53	Intermitentes
5	36	6.27	6.00	Permanentes
6	6	1.47	-----	Permanentes
TOTAL	907	175.77	13.69	

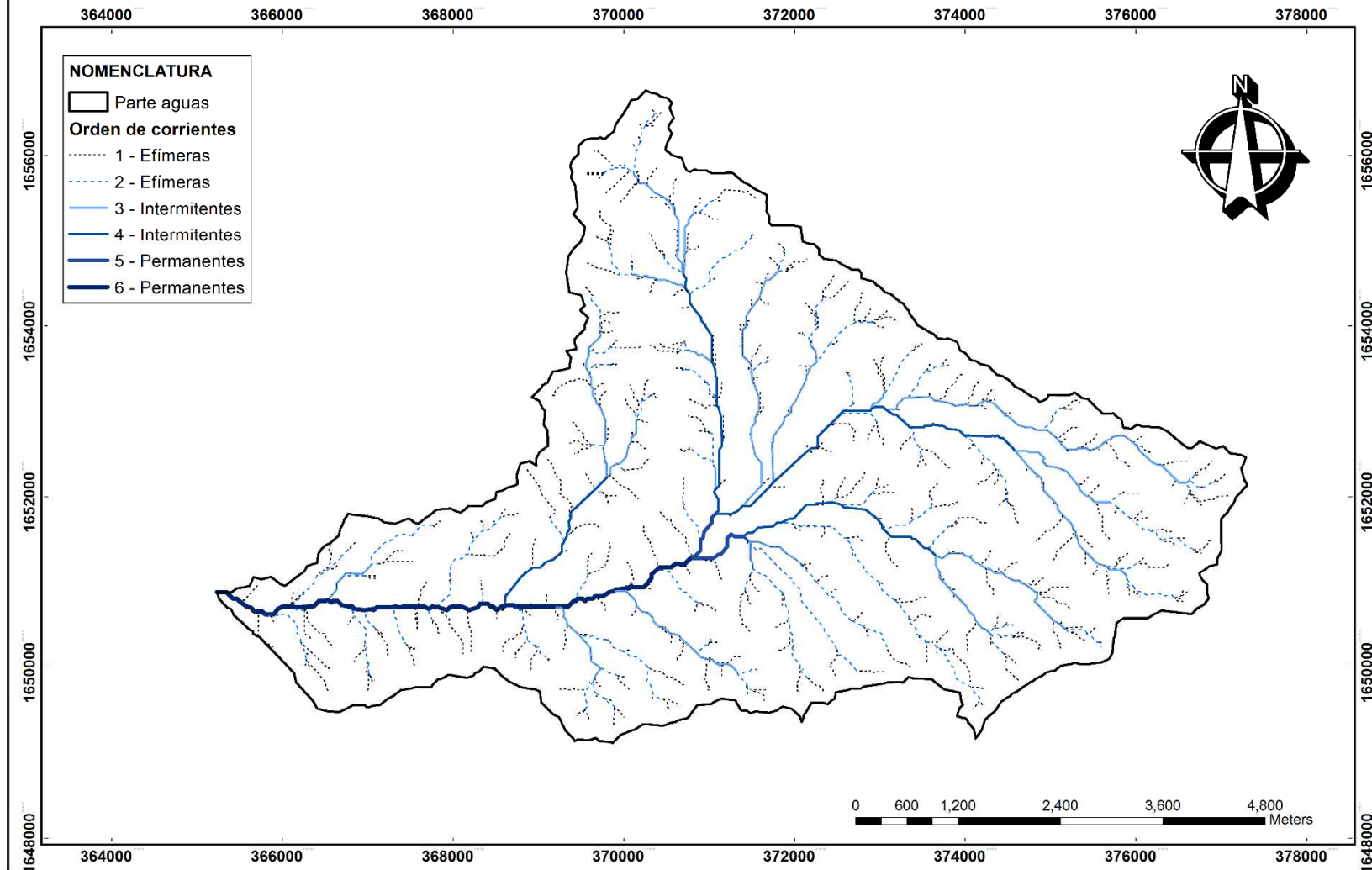
Cuadro 3. Características de la red hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.

De la Red Hídrica		
Descripción	UND	Valor
Longitud del curso principal	km	15
Orden de la Red Hídrica	No. orden	6
Longitud de la red hídrica	km	175.77
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	%	1.47
Tiempo de concentración	horas	1.34
pendiente del cauce principal	m/km	90.67
Densidad de drenaje	(Dd)	4.07

Fuente: Elaboración propia 2015.

Los diferentes segmentos y el número de orden de la red hídrica o de drenaje de la cuenca de estudio se pueden apreciar en el mapa siguiente.

Figura 13. Mapa de la red de hídrica o de drenaje de la microcuenca Turbala.



Elaboración propia 2015.

La red de drenaje es el sistema jerárquico de cauces, desde los pequeños surcos hasta los ríos, que confluyen unos en otros configurando un colector principal de toda la cuenca, teniendo la función de transportar materia y energía en el interior de la misma (González, 2004).

La densidad de drenaje (**Dd**) es uno de los parámetros más importante en el estudio hidrológico, generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con "materiales impermeables a nivel sub superficial, vegetación dispersa y relieves montañosos" (Strahler A, 1964: 4-52) además de ello indica que la cuenca posee suficiente drenaje para cuando se presentan las tormentas. Una cuenca bien drenada generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel subterráneo, de allí que los acuíferos de estas regiones son de bajos rendimientos o en su defecto el volumen de recarga es muy pobre (Ruiz, 2001).

Tabla 14. Valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (Km/Km2)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente: Delgadillo y Páez (2008)

Al comparar los valores resultantes de la red de drenaje de la microcuenca Turbala podemos apreciar que los valores son bastante altos, implicando que si está bien drenada pero que esto desfavorece a los procesos de recarga hídrica debido que es prominente a la escorrentía superficial y a la aparición de avenidas bastante vigorosas.

10.1.4 Parámetros de relieve.

Los parámetros a describir y analizar en este apartado serán: a) Análisis Hipsométrico, b) Altitud media, c) Altitud más frecuente y d) Pendiente promedio de la cuenca en %. Para obtener estos resultados fue necesario crear el mapa de pendientes a partir del MED recurriendo nuevamente al mapa curvas a nivel.

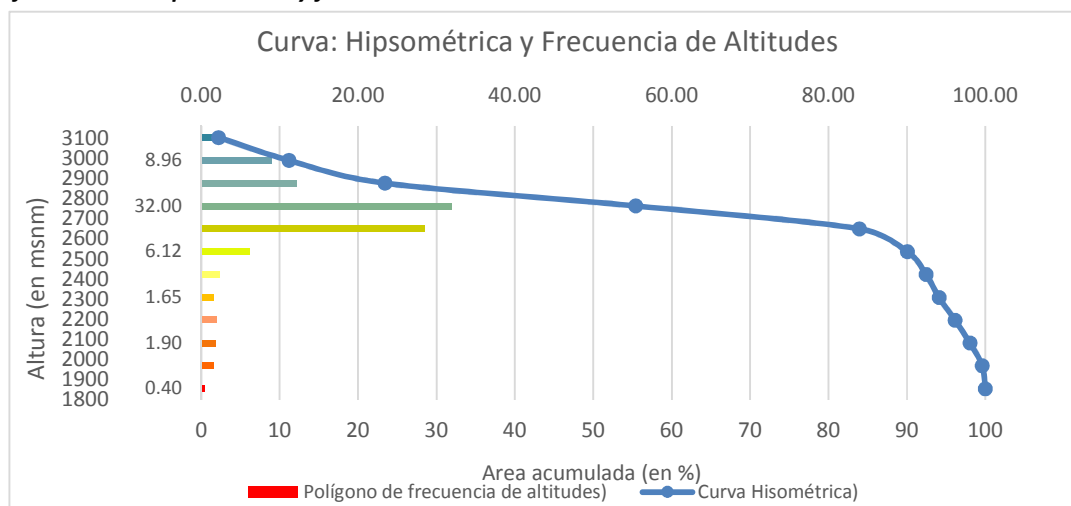
Partiendo del DEM se desarrolló una reclasificación a doce estratos altitudinales estos según (CATIE, 2013) para realizar el análisis hipsométrico, que se refiere a la evolución altitudinal, con el fin de determinar la altitud más frecuente, y la pendiente media de la cuenca.

Estas muestran una relación importante y compleja con la infiltración del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a las crecidas (Anaya Fernadez, abril de 2012). La pendiente de la cuenca es la relación del desnivel que existe entre los extremos de la cuenca, siendo la cota mayor y la cota menor, y la proyección horizontal de su longitud, siendo el lado más largo de la cuenca (VILLON ,2002). El análisis hipsométrico y la evolución altitudinal de la microcuenca se presenta a continuación.

Cuadro 4. Curva hipsométrica y tabla de frecuencias altitudinales de la microcuenca Turbala.

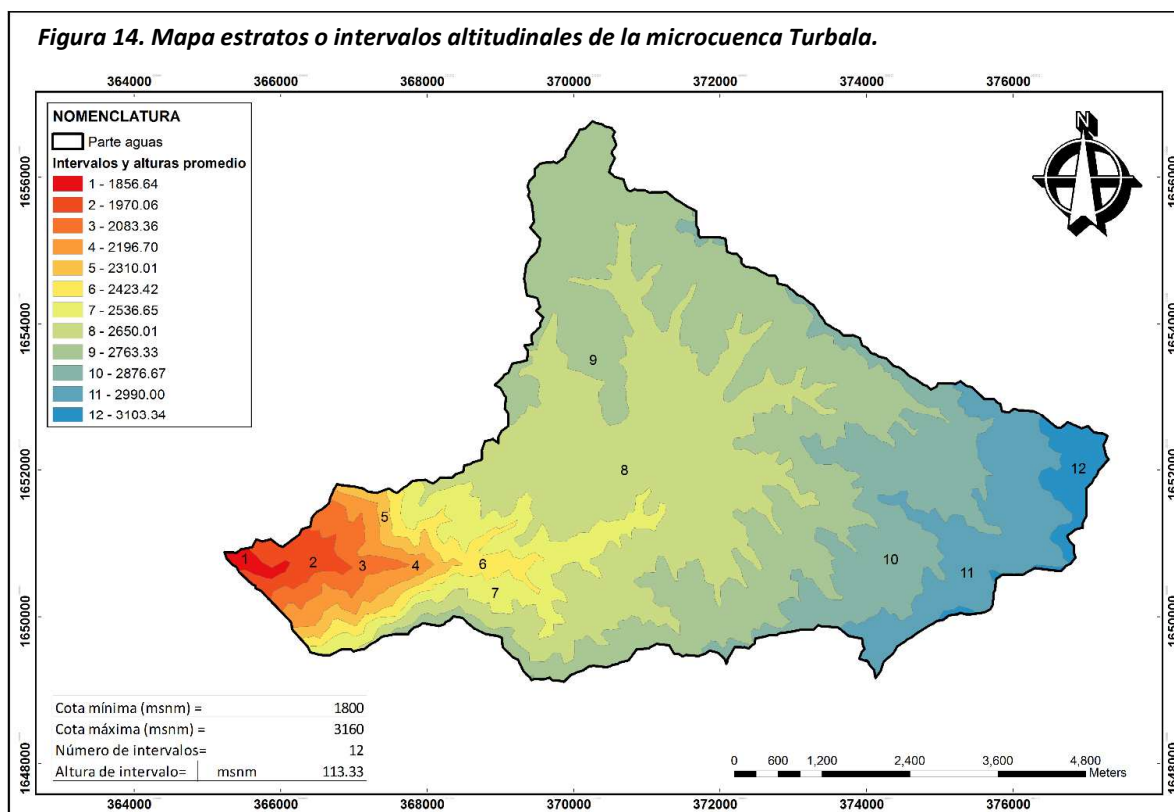
No.	Cota(msnm)			Area (km2)			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Intervalo	Acumulado	% Acum	% Inter
1	1800.00	1913	1856.64	0.1733	43.16	100.00	0.40
2	1913.48	2027	1970.06	0.6754	42.99	99.60	1.56
3	2026.73	2140	2083.36	0.8219	42.31	98.03	1.90
4	2140.09	2253	2196.70	0.8797	41.49	96.13	2.04
5	2253.37	2367	2310.01	0.7135	40.61	94.09	1.65
6	2366.84	2480	2423.42	1.0360	39.90	92.44	2.40
7	2480.00	2593	2536.65	2.6403	38.86	90.04	6.12
8	2593.35	2707	2650.01	12.3074	36.22	83.92	28.51
9	2706.67	2820	2763.33	13.8133	23.91	55.41	32.00
10	2820.01	2933	2876.67	5.2778	10.10	23.40	12.23
11	2933.34	3047	2990.00	3.8664	4.82	11.17	8.96
12	3046.67	3160	3103.34	0.9568	0.96	2.22	2.22

Gráfica 4. Curva hipsométrica y frecuencias altitudinales de la microcuenca Turbala.



Fuente: Elaboración propia 2015.

Figura 14. Mapa estratos o intervalos altitudinales de la microcuenca Turbala.



Fuente: Elaboración propia 2015.

A partir de la Curva Hipsométrica se puede determinar fácilmente la denominada elevación mediana de la cuenca (Linsley et. al., 1949), la cual equivale a la cota correspondiente al 50 % del área de la cuenca. Es frecuente definir el relieve de una cuenca por medio de ésta curva, la cual representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes (López y Blanco, 1976). Por tanto a partir de todos los datos resultantes se pudieron calcular los siguientes parámetros:

Cuadro 5. Parámetros de relieve de la microcuenca Turbala.

Cotas		
Cota máxima	msnm	3160
Cota mínima	msnm	1800
Centroide (PSC:wgs 1984 UTM Zone 15N) proyección GTM		
X centroide	m	371387
Y centroide	m	1652466
Z centroide	msnm	2640
Altitud		
Altitud media	msnm	2640
Altitud más frecuente	msnm	2763
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	2679
Pendiente		
pendiente promedio de la cuenca	%	12.96

Fuente: Elaboración propia 2015.

Tabla 15. Clasificación del terreno en base al porcentaje de pendiente.

Pendiente (s_1) (%)	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
>50	Muy Escarpado

Fuente: (Gaspari, 2012)

Según esta clasificación el terreno de la microcuenca Turbala se cataloga como accidentado.

10.1.4.1 Coeficiente de Masividad (K_m)

Está relacionado con la erosión en la cuenca, expresado en términos de muy montañosa (valores de 0 – 35), montañosa (35 – 70) y modernamente montañosa (70 – 105). Permite diferenciar cuencas de igual altura media y relieves diferentes, (CATIE, 2013). Su ecuación es:

$$K_m = \frac{H}{A}$$

Dónde: H = altura media de la cuenca en m.

A = área de la cuenca en km^2 .

El Coeficiente de Masividad (K_m) para la microcuenca de río Turbala es de 61.18 que significa que se cataloga como una cuenca Montañosa de relieve bastante accidentado que influye directamente en la aparición de avenidas en ocasión de precipitaciones pluviales y que sufre de erosión de sus suelos (Anaya Fernandez, abril de 2012).

Tabla 16. Valores y clasificación de coeficientes de Masividad.

Rangos de (K_m)	Clases de masividad
0 - 35	Muy montañosa
35 - 70	Montañosa
70 -105	Moderadamente montañosa

Fuente: (Fuentes Junco J. J. & Instituto, 2004)

Los parámetros morfométricos tienen gran importancia sobre la respuesta hidrológica que puede observarse en una cuenca. Se componen de parámetros lineales de forma, de drenaje y de relieve, por lo que presentamos un resumen de todos los parámetros obtenidos para este estudio.

Cuadro 6. Parámetros morfométricos resultantes de la microcuenca Turbala.

MICROCUENCA TURBALA		
Parámetros morfométricos	Unidad	Valor
Lineales		
Área	Km ²	43.17
Perímetro	km	37.34
De Forma		
Factor de forma (Horton)		0.19
Coeficiente de Compacidad	(Cc) o (Kc)	1.6
Razón de elongación	(Re)	0.49
De Drenaje		
Longitud del curso principal	km	15
Orden de la Red Hídrica	UND	6
Longitud de la red hídrica	km	175.77
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	%	1.47
Tiempo de concentración	horas	1.34
Pendiente del cauce principal	m/km	90.67
Densidad de drenaje	(Dd)	4.07
De Relieve		
Cota máxima	msnm	3160
Cota mínima	msnm	1800
X centroide	m	371387
Y centroide	m	1652466
Z centroide	msnm	2640
Altitud media	msnm	2640
Altitud más frecuente	msnm	2763
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	2679
Pendiente promedio de la cuenca	%	12.96
Coeficiente de Masividad	(K _m)	61.18

Fuente: Elaboración propia 2016.

10.2 Descripción y análisis de mapas generados a partir de las variables involucradas en la identificación y delimitación de las zonas de recarga hídrica.

10.2.1 Mapa de pendientes

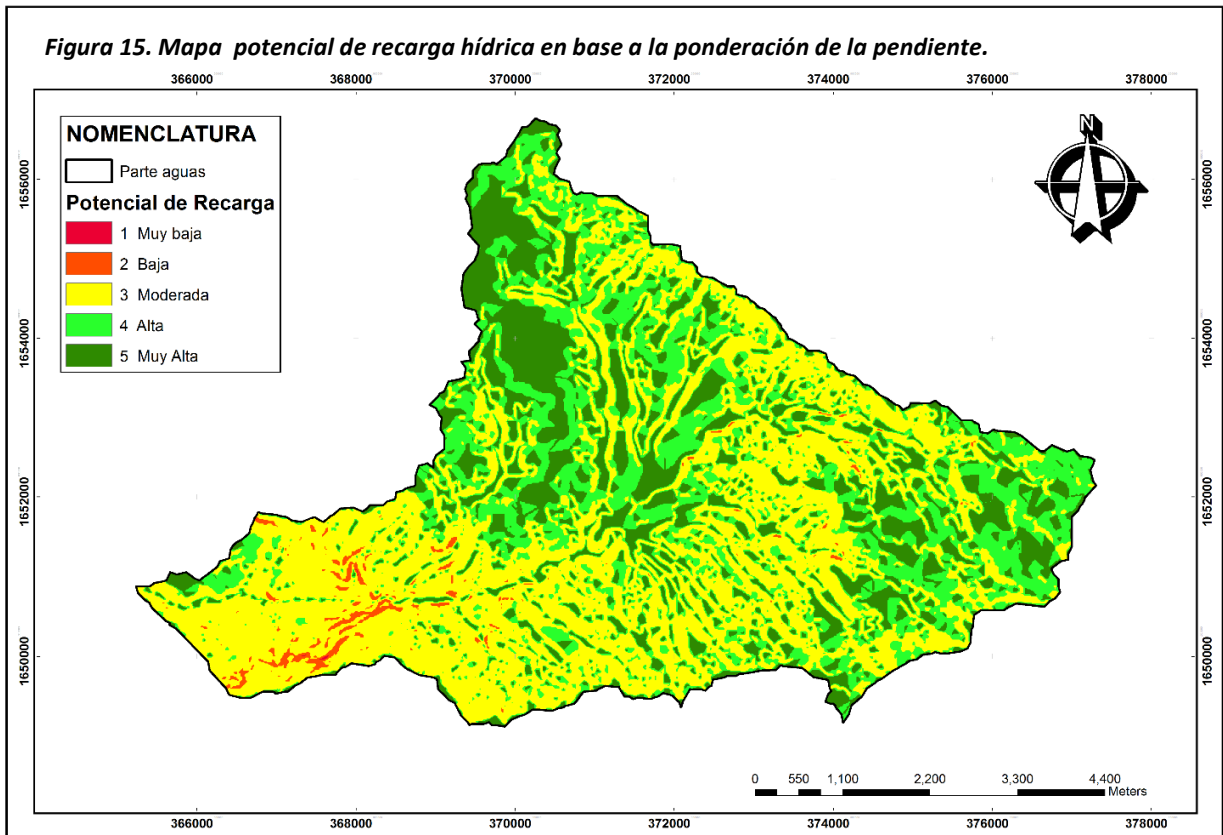
La pendiente tiene una relación importante en cuanto a la infiltración, el escurrimiento, la humedad del suelo y la distribución del agua subterránea, pendientes llanas permiten que el agua de lluvia permanezca por más tiempo sobre la superficie del suelo, ocurriendo lo contrario con las pendientes pronunciadas o escarpadas, las cuales facilitan la aparición de escorrentía superficial; reduciendo de este modo la cantidad de agua que podría infiltrarse en el suelo.

Cuadro 7. Distribución de la pendiente según rango de la microcuenca del río Turbala.

Pendiente en %	Área en m ²	Área en Ha	Área en %	Posibilidad de Recarga	Ponderación
0 a 6	9922050	992.21	23	Muy Alta	5
6 a 15	11525850	1152.59	27	Alta	4
15 a 45	21215925	2121.59	49	Moderada	3
45 a 65	493200	49.32	1	Baja	2
mayor de 65	5175	0.52	0	Muy baja	1
TOTAL	43162300	4316.23	100		

Fuente: Elaboración Propia 2015.

Según la tabla anterior los valores resultantes para la microcuenca Turbala denotan que más del 98 % del área de la misma, van del 6% al 45% de pendiente, estas áreas consideradas como planicies o pendientes llanas, se encuentran en su mayoría en el área de estudio. Si analizamos esta primera variable y la tomáramos como única nos inclinaremos a pensar que quienes aportan más potencial para la recarga hídrica son las 4,266.39 hectáreas, estas distribuidas en su mayoría en los municipios de San Antonio Sacatepéquez, San Marcos y Palestina de los Altos Quetzaltenango, y en una mínima parte, de un tramo del Municipio de San Pedro Sac. San Marcos. Las pendientes que van mayores del 45% se consideran como bajas en su potencial de recarga hídrica debido a que son bastante pronunciadas o escarpadas.



Fuente: Elaboración propia 2015³.

10.2.2 Mapa Tipo de Suelo

La generación del mapa de tipo de suelo, implicó el análisis de dos variables: **textura y la tasa de infiltración del suelo**. Los resultados se presentan por separado, a continuación.

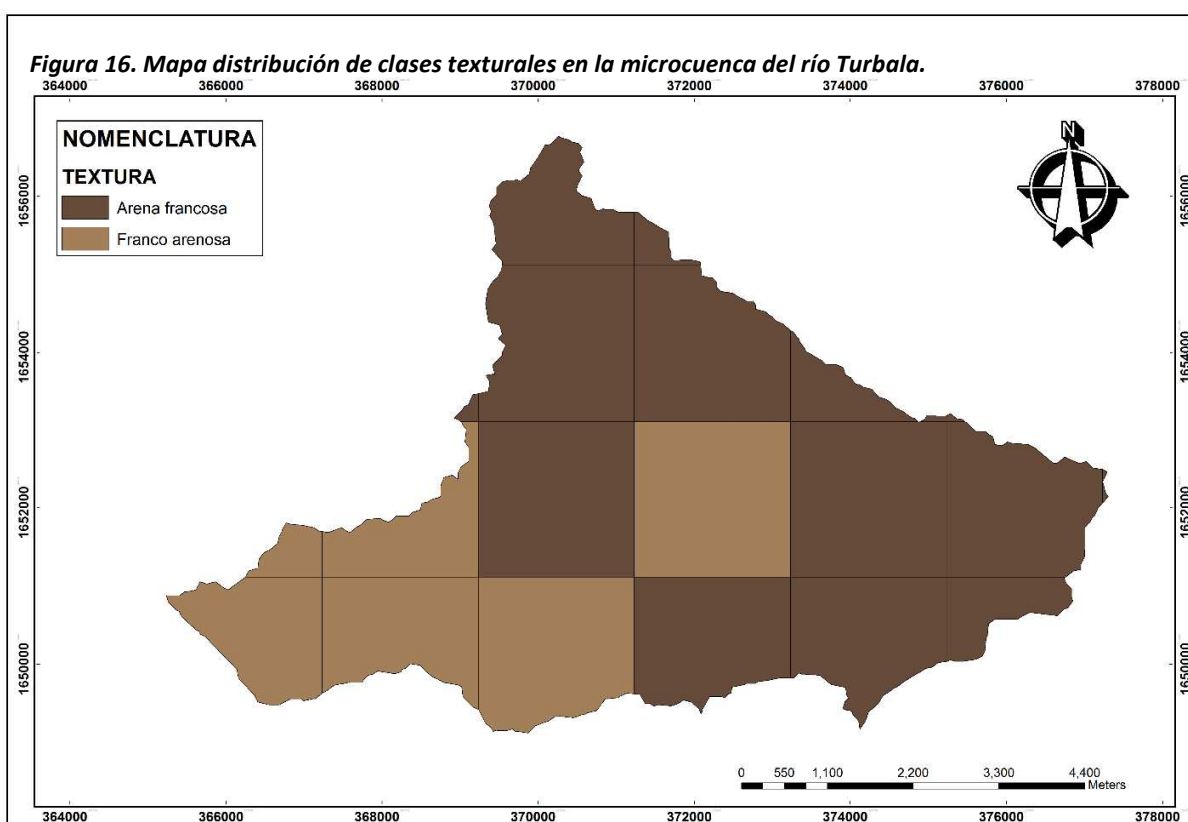
10.2.2.1 Textura del Suelo

Obtenidos los resultados de laboratorio de las muestras recolectadas en campo pasamos a la elaboración del mapa de texturas de suelos y como habíamos mencionado anteriormente, las áreas adyacentes que no se muestrearon, pero por observación determinamos que eran homogéneas al punto de muestreo se les atribuyo el mismo valor de ponderación; de esto se deriva entonces los resultados del siguiente cuadro.

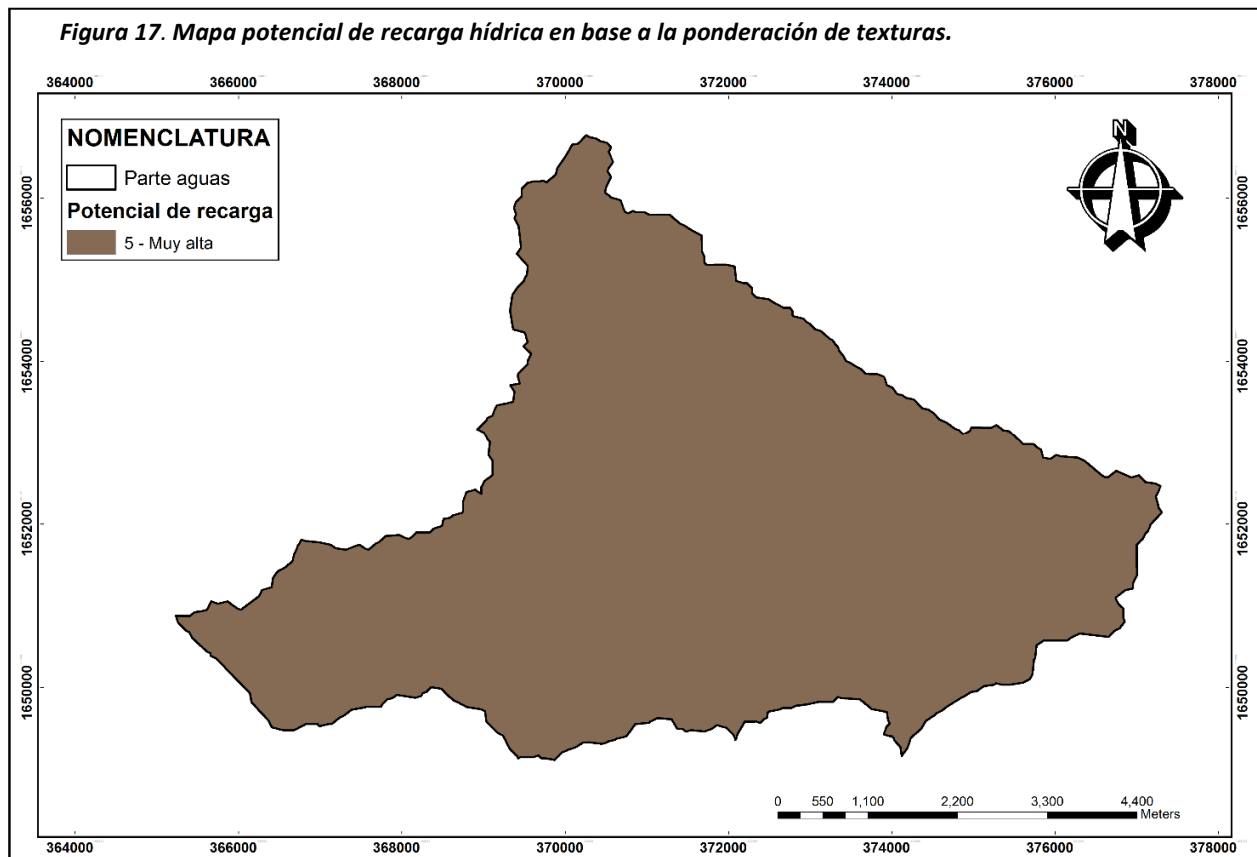
³ Todos los mapas resultantes, están a escala 1:19000 configurados para formato A1

Cuadro 8. Distribución de Clases texturales en la microcuenca Turbala.

Polígono	Textura	Área (m ²)	Área (ha)	Área %	Suma de %	Posibilidad de recarga	ponderación
1	Franco arenosa	2215152	221.52	5.13		Muy alta	5
2	Franco arenosa	2637889	263.79	6.11		Muy alta	5
3	Franco arenosa	3571261	357.13	8.27		Muy alta	5
4	Arena francosa	2993312	299.33	6.93		Muy alta	5
5	Arena francosa	2784704	278.47	6.45		Muy alta	5
6	Arena francosa	1067645	106.76	2.47		Muy alta	5
7	Franco arenosa	461549	46.15	1.07		Muy alta	5
8	Franco arenosa	1877281	187.73	4.35		Muy alta	5
9	Arena francosa	4000000	400	9.27	Franco arenosa	Muy alta	5
10	Franco arenosa	4000000	400	9.27	34.20	Muy alta	5
11	Arena francosa	3999902	399.99	9.27		Muy alta	5
12	Arena francosa	3143611	314.36	7.28		Muy alta	5
13	Arena francosa	12874	1.29	0.03		Muy alta	5
14	Arena francosa	64655	6.47	0.15		Muy alta	5
15	Arena francosa	3676291	367.63	8.52		Muy alta	5
16	Arena francosa	3472994	347.3	8.05		Muy alta	5
17	Arena francosa	903728	90.37	2.09		Muy alta	5
18	Arena francosa	13769	1.38	0.03		Muy alta	5
19	Arena francosa	1993996	199.4	4.62	Arena francosa	Muy alta	5
20	Arena francosa	276131	27.61	0.64	65.80	Muy alta	5



Fuente: Elaboración propia 2015.



Fuente: Elaboración propia 2015.

10.2.2.2 Velocidad de Infiltración (Tasa de Infiltración).

Los resultados de esta variable, se determinaron aplicando el método del Doble cilindro o Anillos de Munz (Universidad Politécnica de Valencia, 2010), en los puntos representativos que consideramos anteriormente; luego de obtener los resultados de las mediciones en campo se realizó el cálculo de la libreta para determinar la tasa de infiltración, como se describen en el apartado **Creación del mapa tipo de suelo** sección **mapa velocidad de infiltración** de la **fase uno**. Dichos valores se presentan a continuación en el siguiente cuadro.

Cuadro 9. Resultados de tasas de infiltración obtenidas a partir de los datos de velocidad de infiltración, y su respectiva ponderación según su potencial de recarga.

Polígono	Tasa de infiltración (cm/h)	Posibilidad de Recarga	Ponderación
1	11.73	Moderada	3
2	11.73	Moderada	3
3	11.70	Moderada	3
4	11.70	Moderada	3
5	11.85	Moderada	3
6	11.73	Moderada	3
7	11.73	Moderada	3
8	11.85	Moderada	3
9	12.22	Moderada	3
10	11.70	Moderada	3
11	12.05	Moderada	3
12	11.90	Moderada	3
13	11.73	Moderada	3
14	11.73	Moderada	3
15	8.72	Moderada	3
16	11.50	Moderada	3
17	11.70	Moderada	3
18	11.73	Moderada	3
19	10.11	Moderada	3
20	11.73	Moderada	3

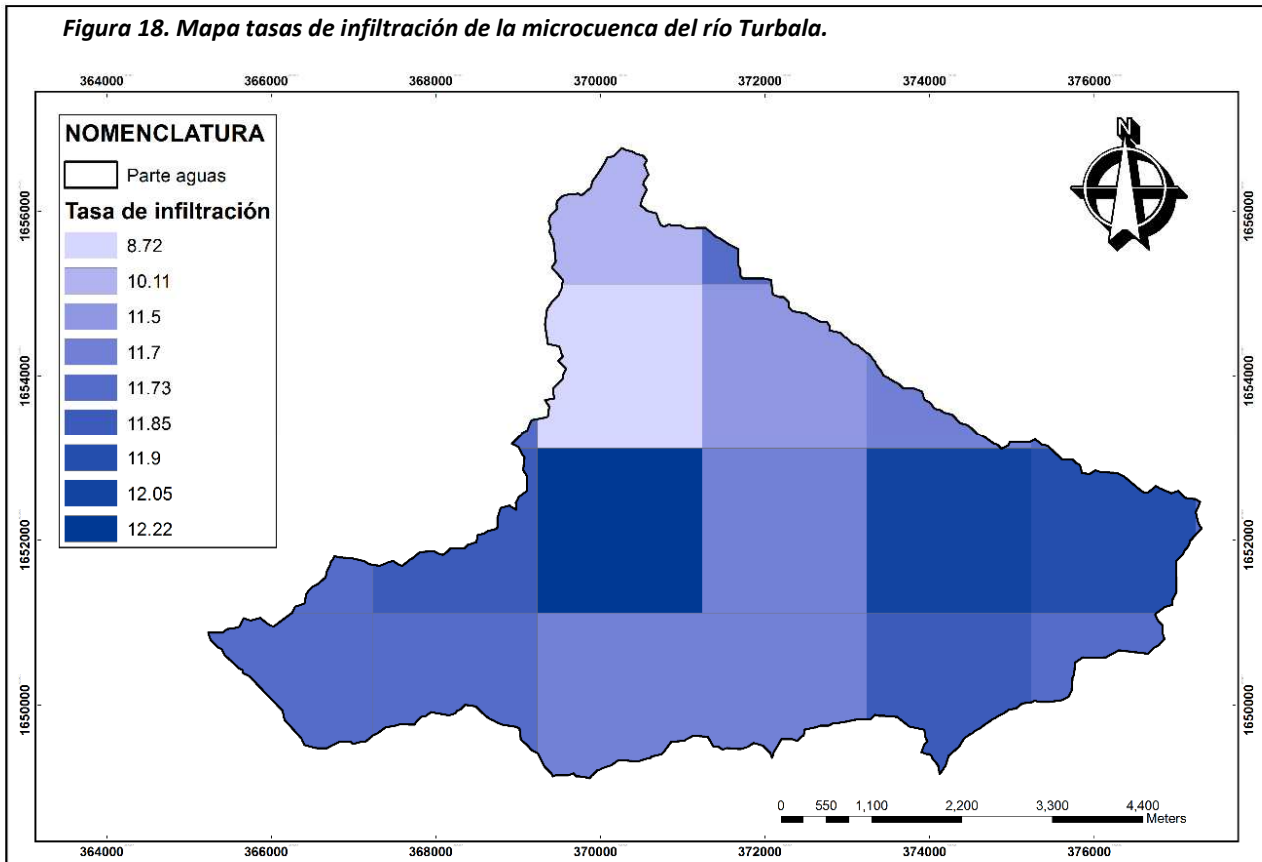
Fuente: Elaboración propia 2016.

De los resultados de la tabla anterior se presentan los siguientes mapas los resultados fueron ponderados en base a la matriz expuesta por Matus Silva.

Al analizar los resultados del cuadro anterior obtuvimos una extraña ligereza o inconsistencia en las tasas de Infiltración referente a la textura del suelo. En los resultados observamos de las tasas de infiltración solo llegan a una escala moderada de posibilidad de recarga hídrica, mientras que la clase textural denota una muy alta capacidad o posibilidad de recarga. Anteriormente, habíamos mencionado en base a definiciones del (INAB., 2003), (Illescas, 1974) y el (MAGA) que debiera de existir una estrecha relación en ambas variables.

Sin embargo, esto se explica, ya que el contenido de partículas primarias del suelo no condiciona por completo la velocidad de infiltración, aunque es uno de los factores más importantes; por lo que otros factores como la estructura del suelo, el grado de compactación, contenido de materia orgánica y el grado de humedad del suelo al momento de aplicar la prueba, también afectan la velocidad de infiltración.

Figura 18. Mapa tasas de infiltración de la microcuenca del río Turbala.



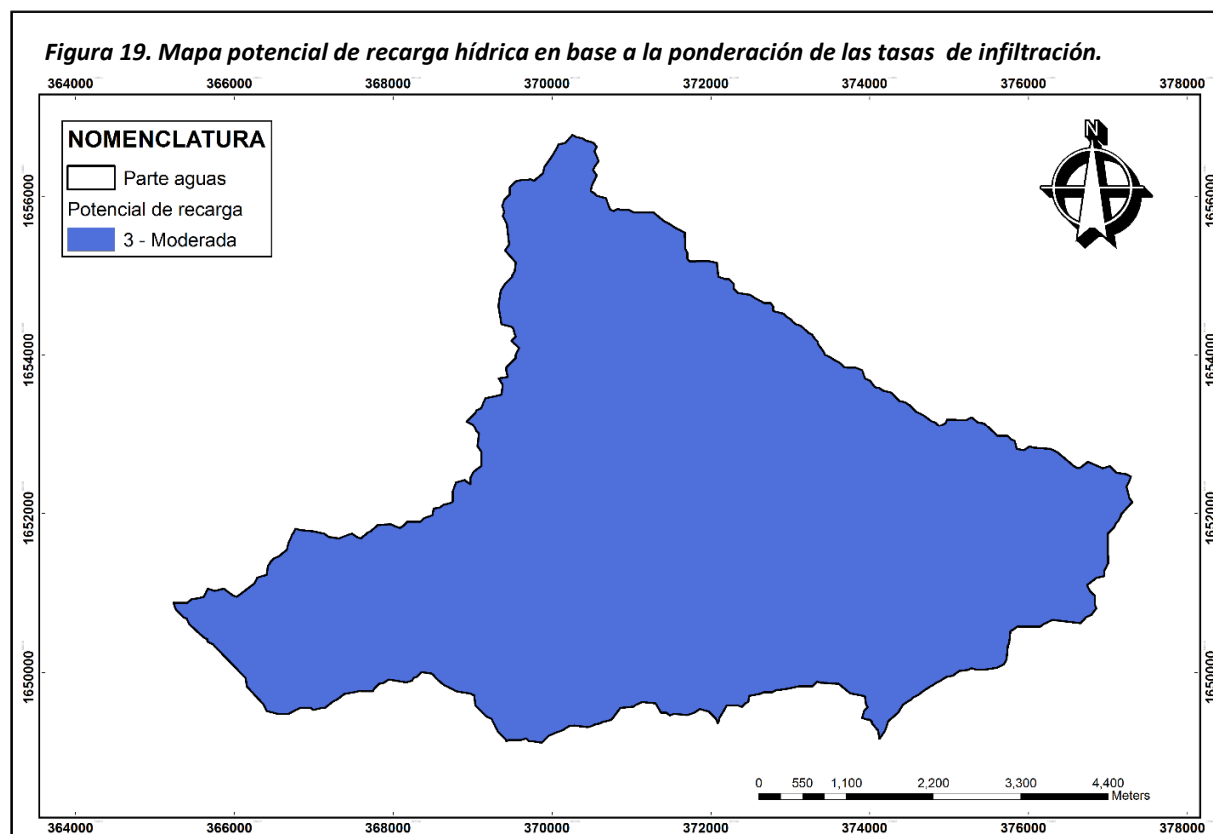
Fuente: Elaboración propia 2015.

Este fenómeno también fue registrado en la investigación desarrollada por (García Alvarez, 2009), en dos de las pruebas de infiltración donde las texturas determinadas estaban catalogadas como de Muy alta posibilidad de recarga hídrica y sin embargo sus valores de tasa de infiltración se clasificaron en los rangos de moderadas.

También consideramos que el fenómeno registrado en el caso de esta investigación se atribuye a que el método de **Doble Cilindro** o **Anillo de Munz** no perturba en alto grado la estructura del suelo, ya que al desarrollar el muestreo de la velocidad de infiltración, solo se retira la maleza u hojarasca depositada en cima del mismo, por el contrario el método de Porchet o cilindro invertido modifica el suelo en cierta medida al hacer un agujero en el suelo.

Por último la ponderación en base a su posibilidad de recarga es de categoría tres y moderada, sin embargo este valor al compararlo a una tabla anexa en el mismo trabajo de

investigación por Matus Silva menciona que de 6.0 a 12.7 cm/h es categorizada como moderadamente rápida, por lo que consideramos que este valor es muy bueno y significativo; adicionando que en todo el territorio no se registró ningún valor atribuido o catalogado como de baja o muy baja posibilidad de recarga hídrica, los resultados de la ponderación se muestran a continuación.



Fuente: Elaboración propia 2015.

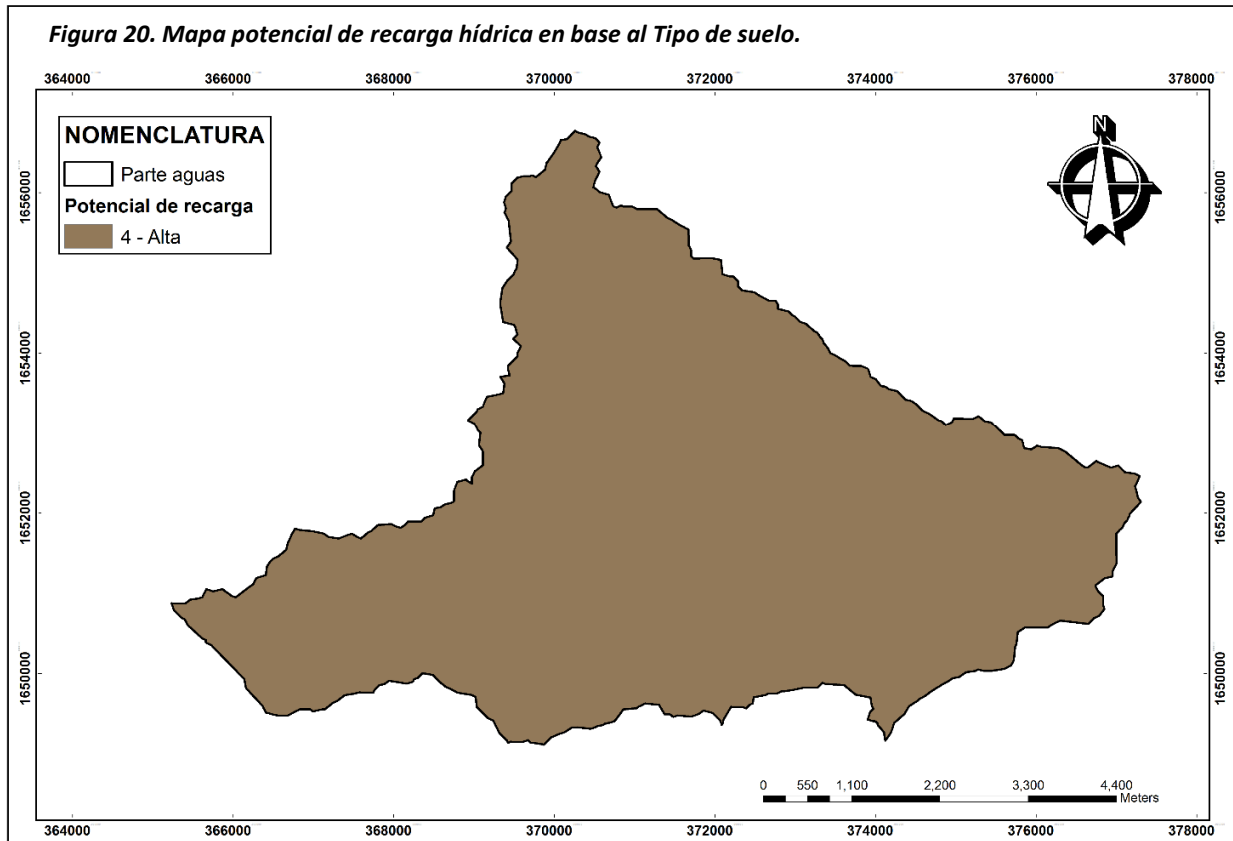
Después de crear los dos mapas y sus respectivas ponderaciones, estos dieron pauta a generar el mapa final **Tipo se suelo** bajo el desarrollo de la siguiente fórmula:

Tipo de Suelo: Valor ponderado "Textura" + Valor ponderado "Velocidad de Infiltración"

2

Dando como resultado el mapa siguiente.

Figura 20. Mapa potencial de recarga hídrica en base al Tipo de suelo.



Fuente: Elaboración propia 2015.

10.2.3 Mapa de Geología

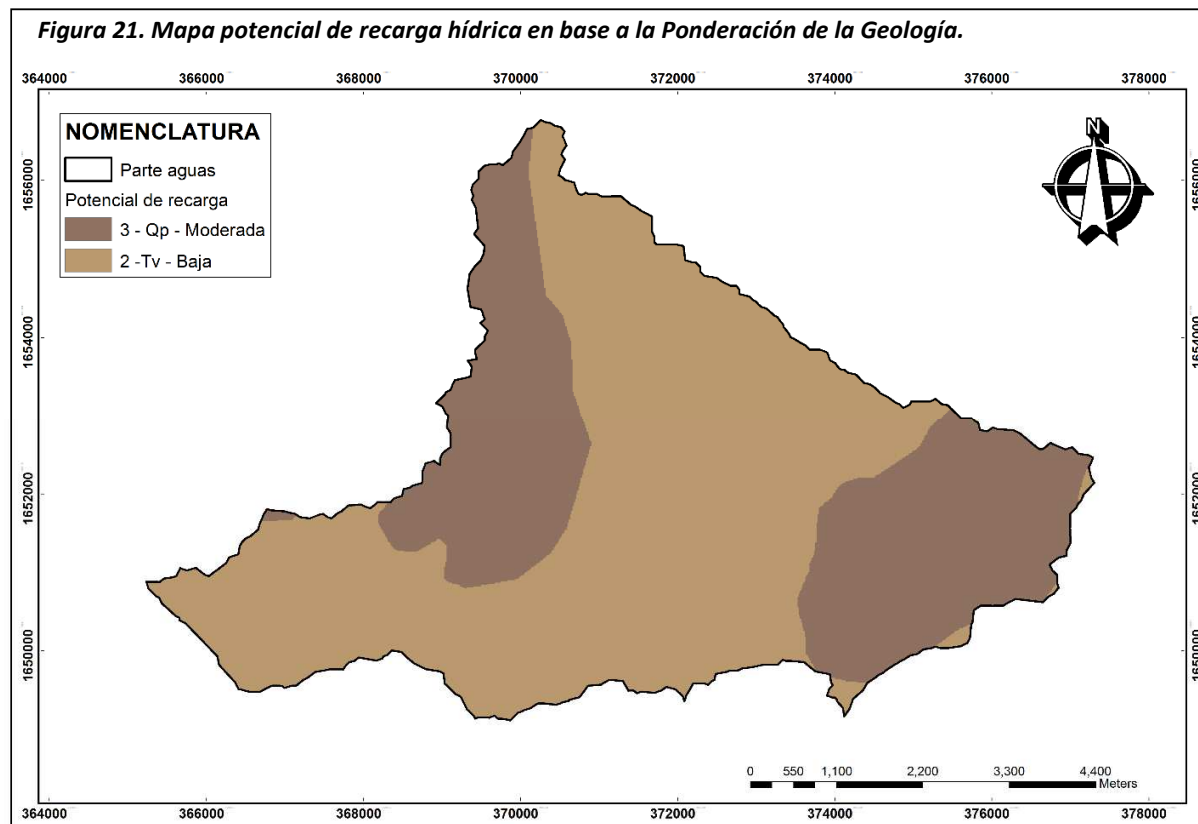
De acuerdo al mapa geológico escala 1:50,000 generado por el IGN, y actualizado por el MAGA se pudo determinar que dentro del área de estudio corren dos tipos de geología Tv y Qp estas según su tipo el área que ocupan dentro de la microcuenca se resume en el Cuadro.

Cuadro 10. Ponderación de la Geología de la microcuenca Turbala.

Geología	Tipo de Roca	Área (m ²)	Área (Ha)	Area %	Posibilidad de recarga	Ponderación
Qp	Rellenos de piroclásticos recientes	15419475	1541.95	36	Moderada	3
Tv	Rocas volcánicas terciarias sin dividir	27742725	2774.27	64	Baja	2

Fuente: Elaboración propia 2015.

Del cuadro anterior podemos ver los resultados contenidos en el siguiente mapa.



Fuente: Elaboración propia 2015, en base a los datos de ING

Las características de las unidades geológicas de la microcuenca Turbala, son las **Rocas volcánicas terciarias sin dividir** o no diferenciadas (**Tv**) que incluyen andesitas⁴, basaltos⁵, tobas⁶ y conglomerados laháricos que cubren el 64% del área de estudio y de

4. Andesitas: lava volcánica intermedia de grano fino, con minerales ferro magnesiano y feldspatos grandes, las andesitas se presentan normalmente como coladas de lava asociadas a masas continentales de color gris a gris oscuro.

5. Basaltos: lava volcánica oscura de grano fino a veces vítrea, con minerales ferro magnesianos, la magnetita es un importante mineral accesorio, son corrientes las cavidades o vacuolas rellenas (amígdalas), son bajos en sílice. Estos se encuentran normalmente en forma de mantos de lava que pueden ser extensos hasta de decenas de kilómetros o más, algunas veces y muy característico de esas rocas es su enfriamiento en columnas pentagonales o mantos tabulares (lajas).

6. Tobas: cenizas volcánicas consolidadas, pueden estar compuestas por cristales de minerales (cristalinas), fragmentos de rocas y pómez (líticas) y fragmentos de naturaleza vítrea (tobas vítreas). Las tobas depositadas en medio acuoso muestran excelentes estratificaciones y estructuras sedimentarias.

Rellenos de piroclásticos recientes (Qp), que son principalmente lapillis de pómez⁷ y pómez de diverso origen re trabajada por agua. Estos son los fragmentos que han expulsado los volcanes en las cercanías y aún los más retirados de la cuenca como el Santiaguito y el Santa María, ya que esta fracción por ser ligera es arrastrada por el viento, incluso cientos de kilómetros y cubren el 34%. (MANCUERNA, 2011).

Una vez descritas las categorías geológicas, presentes en el área de estudio, podemos concretar que más de 2774.27 ha. Pertenecen a la categoría Tv Estas formaciones pueden tener una permeabilidad primaria o una permeabilidad secundaria y se consideran como medianamente capaces de favorecer la recarga hídrica, ya que los basaltos por su grado de fractura, poseen una menor capacidad para facilitar el proceso de infiltración por ende la recarga hídrica.

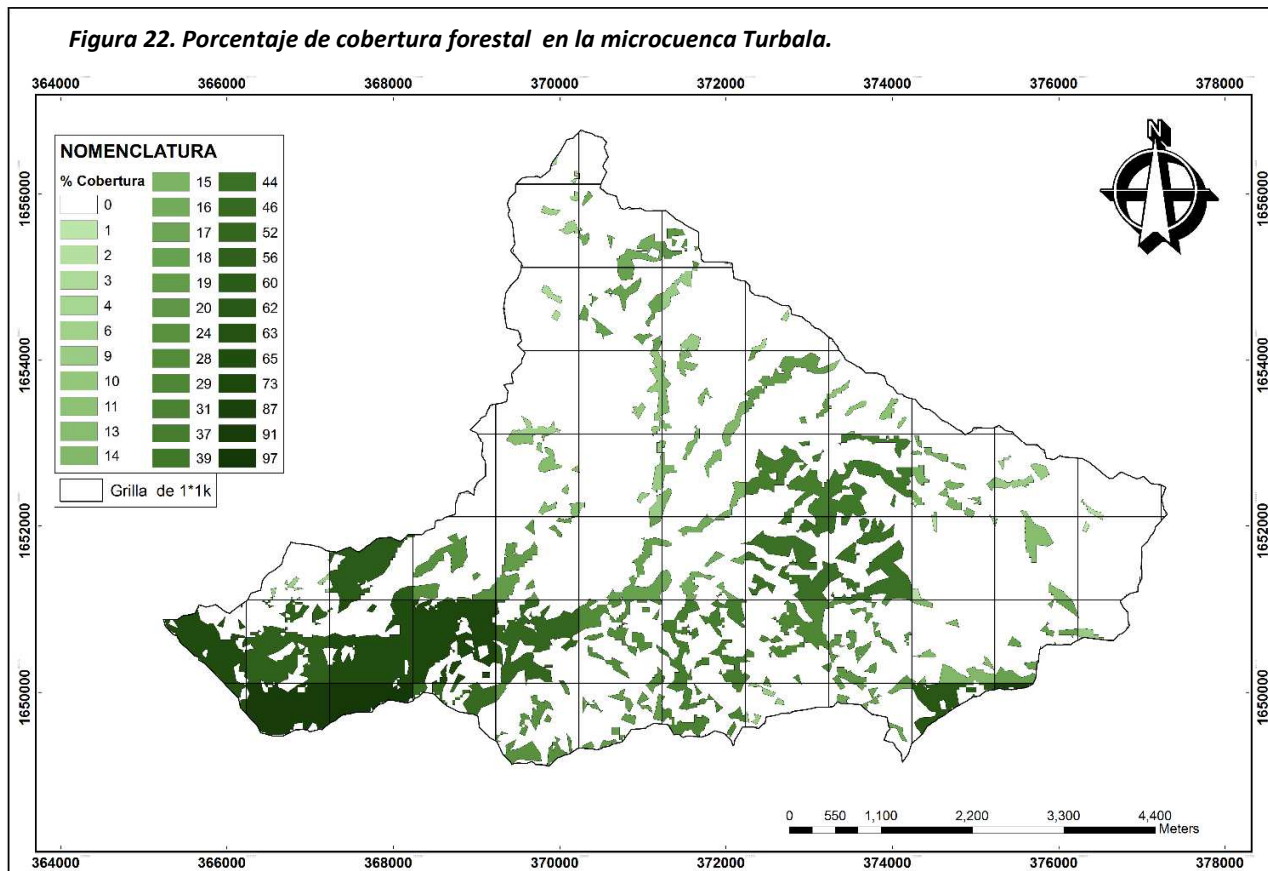
En cuanto a la categoría Qp manifiestan una capacidad de recarga un tanto moderada y en cierta medida potenciada levemente por el grado de fractura del material presente. De la variable geología se podría esperar que estos dos tipos se definan como zonas con un potencial un tanto bajo y moderado para la recarga hídrica.

10.2.4 Mapa porcentaje de cobertura forestal.

Se considera como cobertura forestal al porcentaje de una unidad de terreno que posee vegetación permanente. Como cobertura vegetal permanente se consideraron los tipos de uso: arbustos y matorrales, bosques coníferos, latifoliados y mixtos. Para este estudio los datos fueron extraídos del mapa de cobertura forestal creado y actualizado por el Instituto Nacional de Bosques INAB al año 2010 como lo demuestra el siguiente mapa.

7. Lapillis de pómez: fragmentos volcánicos de proyección aérea entre 3 y 30 mm de composición silíceo, de color claro a rojizo, muy porosos y ligeros, la porosidad se debe a una intensa vesiculación (cavidades), cuyos espacios quedan separados por ligeras membranas vítreas, a esto se debe que cierta pómez flote en el agua.

Figura 22. Porcentaje de cobertura forestal en la microcuenca Turbala.



Fuente: Elaboración propia 2015⁸

La posibilidad de recarga hídrica, será proporcional al porcentaje de cobertura forestal, entre mayor sea el porcentaje de cobertura mayor será la posibilidad de recarga, por tanto los datos más relevantes los constituyen aquellas áreas que posean más del 80% de cobertura vegetal. Tal como lo muestra el cuadro siguiente.

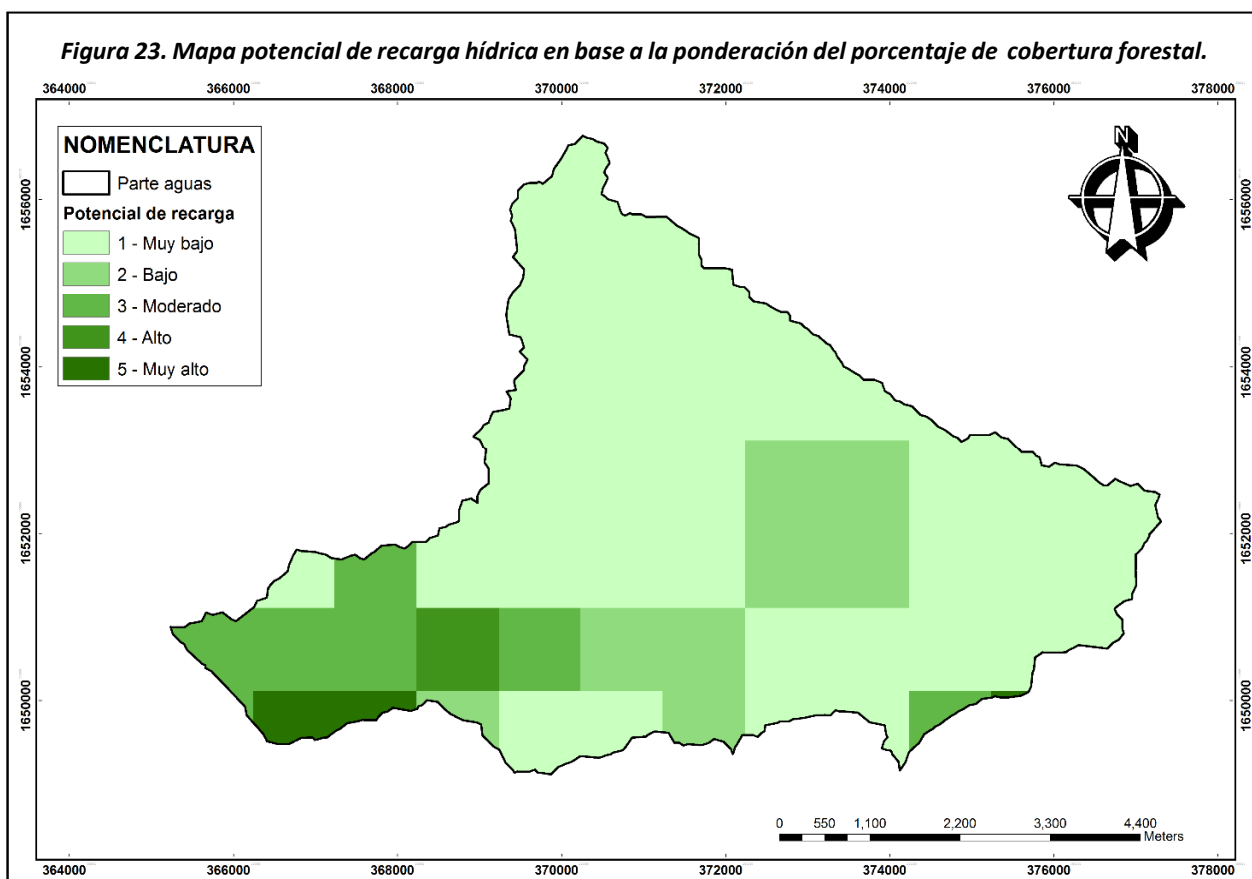
Cuadro 11. Porcentajes de cobertura vegetal y su distribución en la microcuenca de estudio.

% Cobertura	Área (m ²)	Área (ha)	Área en %	Posibilidad de recarga	Ponderación
< 30	29662650	2966.26	69	Muy baja	1
30 – 50	6957000	695.7	16	Baja	2
50 – 70	4635450	463.55	11	Moderada	3
70 – 80	994950	99.5	2	Alta	4
> 80	912150	91.22	2	Muy Alta	5

Fuete: Elaboración propia 2015.

⁸ El mapa porcentaje de cobertura forestal es en base a los datos generados por el Instituto Nacional de Bosques INAB para el año 2010 respecto a la distribución de cobertura forestal a nivel nacional en el período 2006 – 2010.

Los resultados al clasificar los porcentajes y la distribución de la cobertura forestal se resumen en el mapa siguiente.



Fuente: Elaboración propia 2015.

Al analizar la variable cobertura forestal podemos observar el comportamiento en cuanto a la distribución de las zonas con mayor porcentaje de cobertura vegetal, este se puede explicar por dos condiciones claves que participaron en el cálculo.

La primera, relacionada con las unidades de terreno utilizadas como unidades de mapeo para el cálculo, consideradas como 100% de área, ya que la generación de estas unidades se obtuvieron al considerar el criterio de (Rossiter, 2004), donde las unidades están a intervalos de 1,000,000 m² o su equivalente a 1 km², para un muestreo a semi detalle.

Estas unidades dieron como resultado unidades relativamente pequeñas y abundantes en las partes bajas; el porcentaje de cobertura se determinó en base a la razón: [área cubierta / área total de muestreo] para cada unidad; Lo que favoreció que las unidades fuesen cubiertas en mayor proporción por la vegetación permanente circundante.

La segunda condición es el hecho de que en estas áreas se denota la mayor concentración de bosques, principalmente coníferos latifoliados y mixtos. Lo que hace suponer en este punto que en cuanto al nivel de cobertura del suelo, estas zonas generan un potencial medio, alto y muy alto de recarga hídrica.

10.2.5 Mapa uso del suelo.

Los resultados del uso del suelo de la microcuenca Turbala se denotan en cinco categorías prominentes como las vemos reflejadas en el cuadro siguiente.

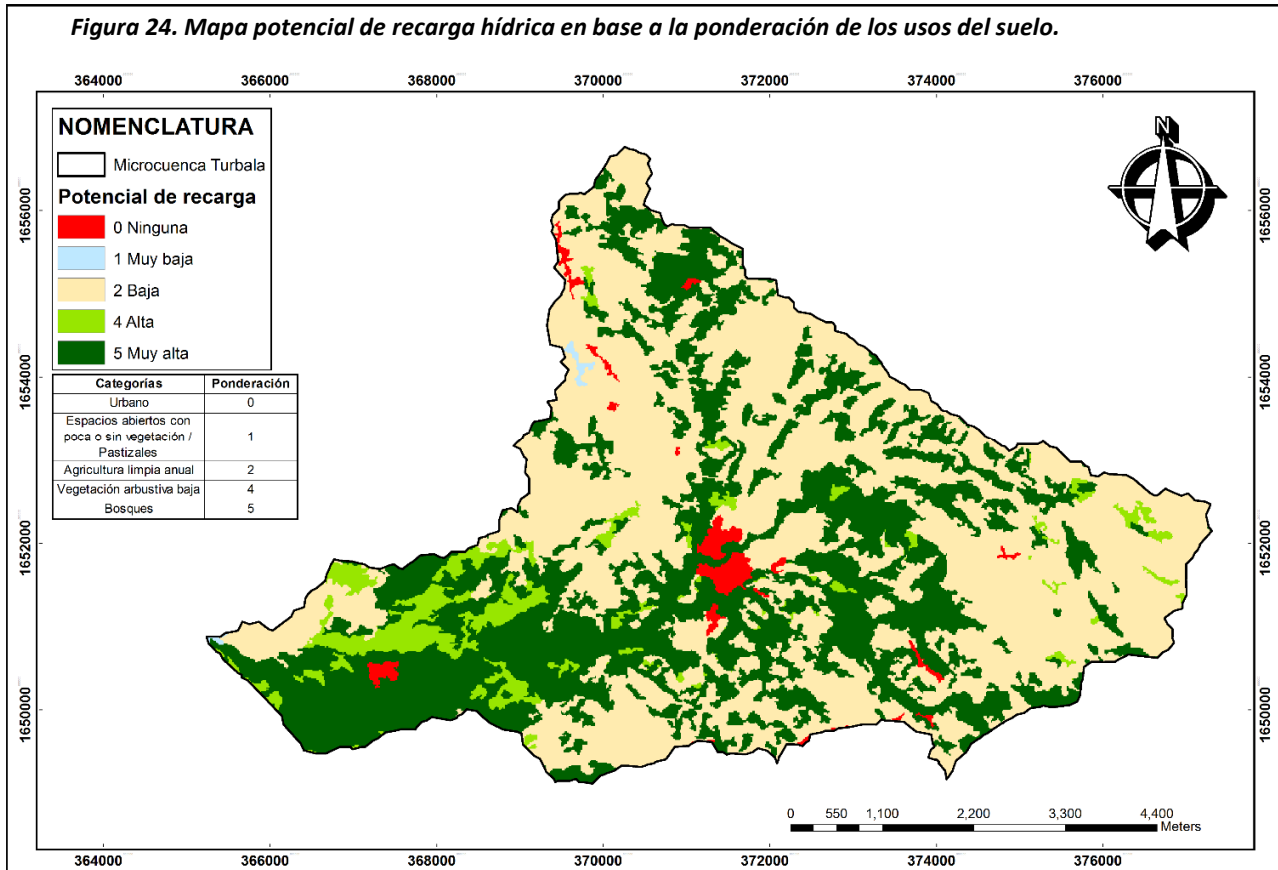
Cuadro 12. Uso del suelo de la microcuenca Turbala

Categorías	Área (m ²)	Área (Ha)	Área %	Posibilidad de recarga	Ponderación
Urbano	668250	66.83	1.55	Ninguna	0
Espacios abiertos con poca o sin vegetación / Pastizales	66375	6.64	0.15	Muy baja	1
Agricultura limpia anual	23640300	2364.03	54.77	Baja	2
Vegetación arbustiva baja	2221875	222.19	5.15	Alta	4
Bosques	16565400	1656.54	38.38	Muy alta	5

Fuente: Elaboración propia 2015.

Con los datos de la tabla anterior vemos los resultados descritos en el mapa del uso del suelo del área de estudio y sus respectivas ponderaciones en base a su potencial de recarga.

De todos los datos enmarcados en el cuadro 12 y plasmados espacialmente en el mapa del uso del suelo de la microcuenca Turbala, cabe resaltar que las categorías que más atribuyen a la recarga hídrica son la de bosques y vegetación arbustiva estas constituyen un 43.53% del área total de la misma reflejadas en 1878.73 ha de bosques mixtos con especies predominantes como pino, ciprés aliso y encino, encontrándose principalmente en la parte baja de la microcuenca por lo regular en áreas de topografía quebrada o de difícil acceso.



Fuente: Elaboración propia 2015⁹

También plantaciones de pinabete en menor escala encontrado en la parte media y alta de la microcuenca. También en esta categoría están presentes especies latifoliadas siendo las más prominentes aliso, roble y encino estas encontradas en la parte media de la cuenca con pendientes llanas o moderadas también la parte baja creando así escenarios de bosques naturales mixtos.

Con respecto a la agricultura limpia anual, este estrato está formado por la producción de papa, maíz y frijol, y también la producción de hortalizas las cuales abarca el 54.77% del

⁹ El mapa uso del suelo fue generado en base a los datos del grupo interinstitucional de monitoreo de bosques y uso de la tierra en el año 2012.

área de estudio. Se encuentra localizada o esparcida en todo el territorio de la microcuenca Turbala.

En este apartado cabe mencionar que la cobertura forestal y el uso del suelo son dos factores que atribuyen considerablemente valores a la posibilidad de recarga hídrica, sin mencionar que ambos son modificables por mano del hombre y pueden considerarse como factores de riesgo, su modificación va a depender directamente de los usos a los cuales el suelo sean sometidos por consideraciones de sus propietarios y claramente de la motivación de trabajarlos de una forma sostenida.

Vemos reflejado en el mapa uso del suelo que la presión por los recursos naturales en el área de estudio es considerable, sin mencionar que también se excluyen áreas donde están los asentamientos poblacionales y estos no contribuyen ninguna posibilidad de recarga, debido que al pavimentar o establecer viviendas son áreas que se impermeabilizan. Por consiguientes estas se restan a las áreas con potencial de recarga.

10.3 Mapa delimitación de las zonas potenciales de recarga hídrica.

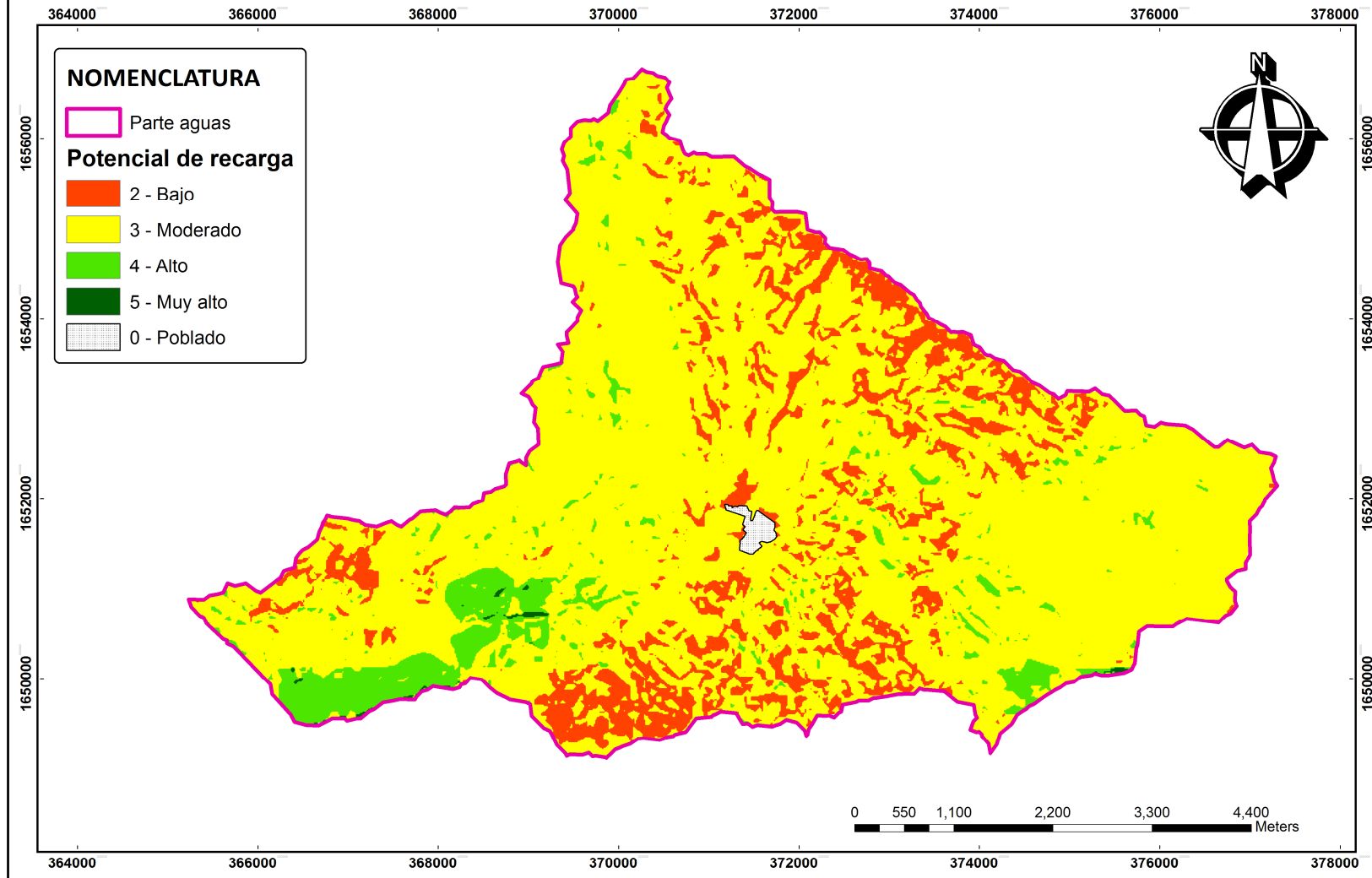
Una vez terminado el proceso de creación de los mapas basados en las matrices de ponderación respectivas para cada variable propuesta en la metodología de Matus Silva, se procedió a la delimitación de las zonas de recarga hídrica según su potencial. A este proceso se sumó las herramientas del software ArcGis y el principio del algebra de mapas que consiste en multiplicar los valores obtenidos de cada mapa resultante por el peso de cada una de las variables, para finalmente sumar estos valores como se explica a continuación.



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

El producto de todo el procesamiento raster de estos mapas fue el mapa delimitación de zonas de recarga hídrica según su potencial este se muestra a continuación.

Figura 25. Delimitación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en la microcuenca del río Turbala.



Fuente: Elaboración Propia 2015.

Cuadro 13. Distribución de zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Turbala.

Potencial actual de recarga hídrica				
Potencial de Recarga	Valor	Área (m)	Área (Ha)	Área %
Bajo	2	6040125	604.01	13.99
Moderado	3	34263900	3426.39	79.38
Alto	4	2660625	266.06	6.16
Muy alto	5	72675	7.27	0.17

Fuente: Elaboración propia 2015.

Del mapa y cuadro anteriores podemos observar las zonas resultantes que se delimitaron en base a su potencial de recarga hídrica, las cuales fueron, Muy alto, Alto, Moderado y Bajo. Los potenciales Muy alto y Alto constituyen un 6.33% de todo el área de la microcuenca del río Turbala, estas se encuentran distribuidas en su mayoría en la parte baja de la microcuenca, sin menospreciar, manchones en la parte media y alta de la misma; las características que contribuyen a este potencial son: un porcentaje de cobertura forestal que va desde un 60% hasta un 97% (áreas con bosques de pino, latifoliadas y mixtos), un buen uso de sus suelos, texturas gruesas e Infiltración moderadamente rápida, lo que maximiza su potencial, superando el inconveniente de pendientes que van desde un 15% a más del 65%, y un geología con un potencial de recarga bajo debido a su permeabilidad secundaria.

Zonas con potenciales Moderado y Bajo constituyen más del 90% de toda el área de la microcuenca del río Turbala, estas se hacen presentes en toda el área de estudio, al analizar estas zonas observamos que el potencial se ve disminuido en gran parte debido a que la cobertura forestal disminuye a porcentajes que van del 10% al 50%, los usos del suelo se marcan drásticamente por el avance de la frontera agrícola haciendo presión en los recursos naturales.

Sin embargo La compensación del potencial de recarga hídrica de estas áreas está ligada a que mejora la pendiente considerablemente en rangos del 0% al 6% en sus mejores condiciones y en las depreciaciones del relieve más pronunciadas llega a un 45%, esta variable en la ecuación presentada por Matus Silva, es la que más peso tiene y por ende condiciona también el potencial de recarga hídrica. A esto se suma una tasa de infiltración moderada, texturas gruesas y una geología con permeabilidad primaria y secundaria.

XI ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y USOS DE LA TIERRA

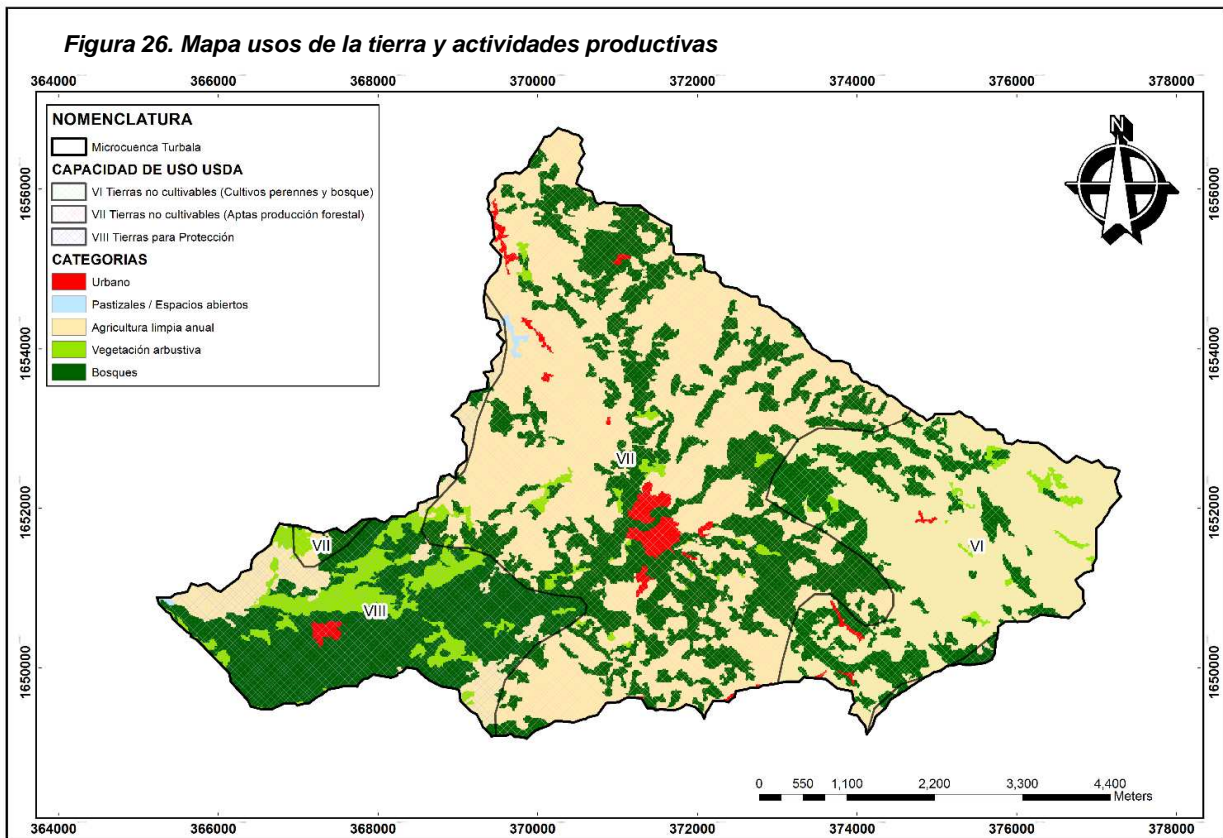
11.1 Uso de la tierra:

La mayor superficie de la microcuenca (alrededor del 54.77% del área total) está ocupada por agricultura limpia anual, sin embargo se encuentran otras variantes en relación al uso actual, las cuales se indican en el Mapa de Uso de la Tierra, donde a continuación se hace una descripción de los usos de la tierra en la microcuenca.

Tabla 17. Usos de la tierra y actividades productivas.

Categorías	Área (Ha)	Área %	Descripción
Urbano	66.83	1.55	Son las áreas consideradas como asentamientos poblacionales tales como la cabecera municipal de Palestina de los Altos entre otras áreas de tamaño significativo que permeabilizan el suelo por acción de la construcción de viviendas o por pavimentación.
Espacios abiertos con poca o sin vegetación / Pastizales	6.64	0.15	Estos espacios están distribuidos en la parte media y baja de la microcuenca, en existencia de pastizales o áreas de barbecho y áreas muy pequeñas que sirven para pastoreo de ganado ovino en su mayoría, y en menor escala vacuno
Agricultura limpia anual	2364.03	54.77	Este estrato está formado por la producción de papa, maíz, frijol, haba, principales cultivos de auto consumo, y muy bajo porcentaje para comercialización en mercados locales. Se encuentra localizado en la parte alta media y parte baja de la microcuenca también en este estrato comprende todas aquellas tierras que actualmente están siendo utilizadas con fines agrícolas. También las hortalizas han tomado auge como una fuente importante de ingreso económico para las familias del área; las hortalizas más importantes sembradas por los agricultores son: la coliflor, el repollo, el brócoli y la zanahoria.
Vegetación arbustiva baja	222.19	5.15	Este estrato se encuentra distribuido en la parte baja de con especies como arrayan, guamil, matorrales, y otras especies arbustivas, que también cumplen funciones como la de plantas nodrizas contribuyentes a la regeneración natural, presentes en la microcuenca con pendientes pronunciadas y de difícil acceso.
Bosques	1656.54	38.38	Comprende los rodales de bosque natural compuestos en su mayoría de especies coníferas; distribuidos en su mayoría en la parte baja de la microcuenca por lo regular en áreas de topografía quebrada o de difícil acceso. También bosques mixtos, reforestaciones y regeneración natural, distribuido en la parte alta en mayor porcentaje y también en la parte media de la microcuenca.

Fuente: Elaboración propia en base al PDM MANCUERNA 2011



Fuente: Elaboración propia 2016¹⁰

Es indudable que las características edáficas de la microcuenca limitan la diversificación y la productividad de la misma puesto que la mayor parte del área de la microcuenca es apta para la producción y protección forestal, según clasificación del USDA; es decir, que las condiciones no se adaptan a las actividades agrícolas, debido a la topografía quebrada y escarpada, obliga a que se implementen prácticas físicas para la conservación de suelos, ya que se registran a nivel de la microcuenca índices elevados de erosión y de deposición de sedimentos.

11.2 Intensidad de Uso de la Tierra:

Para establecer el grado de intervención humana en la modificación de los ecosistemas naturales y analizar la posible utilización sostenida del medio, se analizó la intensidad de

¹⁰ Los datos son obtenidos del grupo interinstitucional de monitoreo del bosque y la tierra 2012 y la información contenida en el plan de manejo de la microcuenca Turbala MANCUERNA 2011

uso de las fincas a través de la coincidencia entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra. Como resultados son las siguientes categorías:

11.2.1 Tierras con utilización adecuada

Corresponde a aquellas áreas donde existe correspondencia entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra; en la microcuenca del río Turbala más del 22% tiene relación (usos correcto) entre los usos actuales y la capacidad o potencial de uso de la tierra, están las áreas correspondientes a los bosques mixtos existentes en la parte baja de la microcuenca. *[VIII - Tierras para protección]*.

11.2.2 Tierras sobre-utilizadas

Corresponde a áreas en las que la intensidad de uso actual es superior a la capacidad de uso de la tierra. El Mapa de uso del suelo demuestra que, alrededor del 77.00% del área total de la microcuenca en comparación de la clasificación del USDA tiene un sobre uso, ya que en esta áreas es donde están establecidas las actividades de agricultura limpia anual; mientras que debería de existir asocio de especies forestales y cultivos. *[VII - Tierras no cultivables, aptas para producción forestal]*.

11.2.3 Tierras sub utilizadas:

También encontramos la intensidad de uso sub-utilizado, áreas donde la pendiente es menor al 15% y existe producción de hortalizas, sin embargo la capacidad de los suelos indica que debería haber una cobertura forestal, conociendo las ventajas que la cobertura vegetal representa para el suelo protegiéndolo de la erosión, a diferencia de los cultivos anuales; además no hay otros cultivos que puedan cumplir con el propósito de generar ingresos y proteger el suelo. *[VI – Tierras no cultivables cultivos perennes y bosques]*.

11.3 Estratificación forestal:

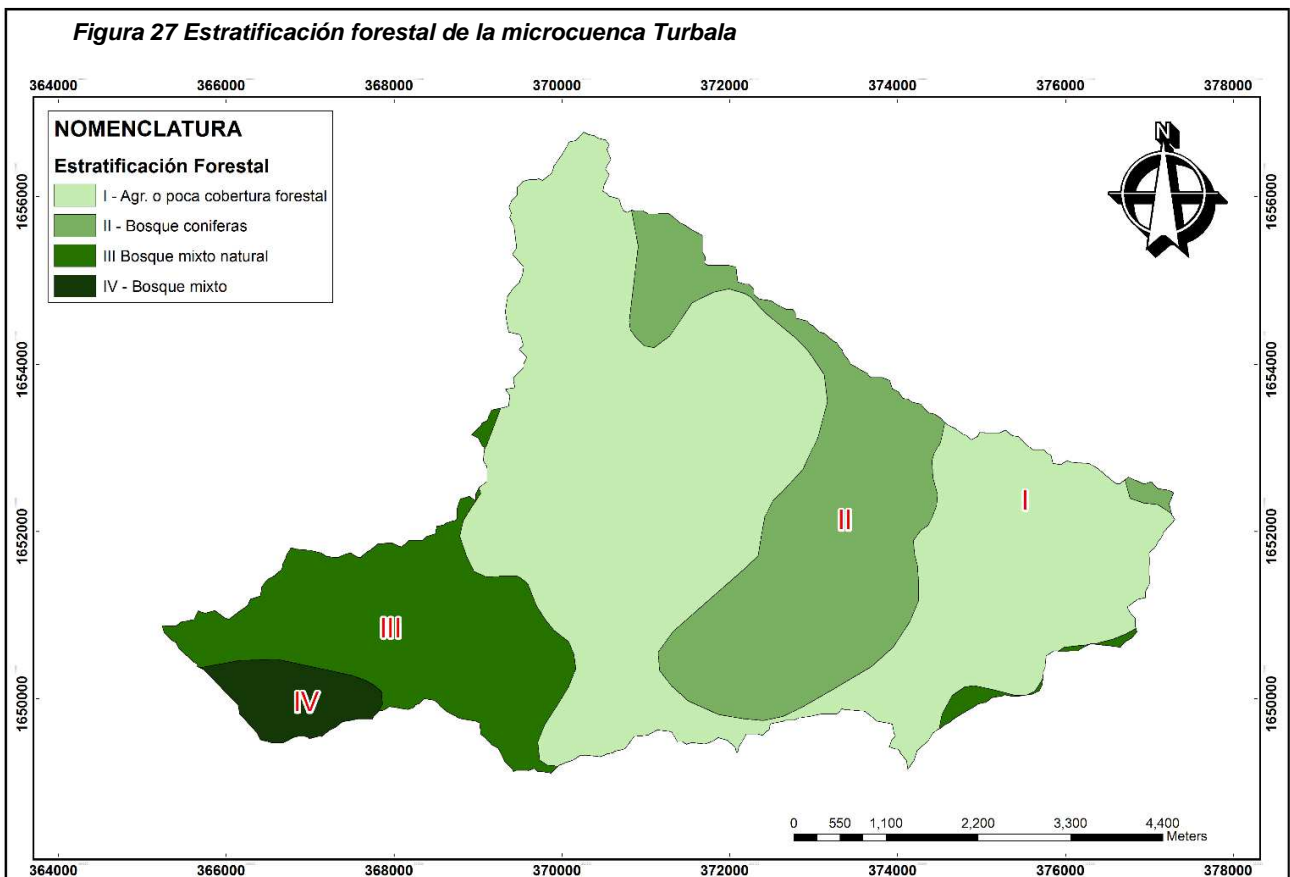
La cubierta forestal presente en diferentes partes de la microcuenca, está constituida por bosques naturales mixtos y en asociación con cultivos donde las especies predominantes en el área son las siguientes:

11.3.1 Bosque de coníferas

Este tipo bosque se ubica en la parte alta de la microcuenca, específicamente en las zonas que rodean la cabecera municipal de Palestina; representa el 9.68% del total de la cobertura forestal. Las principales especies que lo conforman son: Ciprés (*Cupressus lusitanica* Miller), Pino (*Pinus ayacahuite* Ehrenb) y (*Pinus hartwegii*).

11.3.2 Bosque mixto:

Este tipo bosque se ubica en la parte media y baja de la cuenca del total de la cobertura forestal; las principales especies que lo constituyen son coníferas: Pino (*Pinus ayacahuite* y *P. hartwegii*) y latifoliadas: encinos (*Quercus* sp.); aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.); taxiscobo (*Perymenium stirgulosum* Greem); y madrón (*Arbutus xalapensis*). Se localiza en los alrededores de Palestina de los Altos y Comunidades de San Pedro Sacatepéquez en la parte baja.



Fuente: Elaboración 2016. En base a los datos INAB 2010

XII LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL MANEJO DE LAS ZONAS DE RECARGA HIDRICA SEGUN SU POTENCIAL

Los lineamientos generales para el manejo de las zonas de recarga hídrica identificadas en la microcuenca Turbala, han sido elaboradas referentes a las condiciones biofísicas y los usos del suelo actualmente, estas características y actividades benefician o limitan el potencial de recarga hídrica.

A consideración de lo expuesto anteriormente, también hacemos mención de ciertas recomendaciones que deben tomarse en cuenta para todo el territorio caracterizado puesto que la en la matriz se contemplan recomendaciones específicas según el potencial caracterizado.

a) Iniciar y facilitar los procesos para desarrollar el primero borrador de Ordenamiento Territorial; para ello iniciar mesas de dialogo entre las distintas dependencias municipales de planificación DMPS, DAPMAS, OMMS, CONREDS, COLREDS, instituciones presentes en el área y ONG's vinculadas a este tema para que contribuyan con insumos en temas de planificación y gestión.

b) Actualmente se está elaborando la primera propuesta de políticas ambientales para dicho territorio por lo que es de suma importancia que las instituciones a cargo, puedan incluir los fines y propósitos de esta investigación en la misma y tener más insumos referentes a tomar en cuenta.

c) Fomentar y fortalecer la participación comunitaria en temas de gestión ambiental, capacitando a organizaciones comunitarias, beneficiarios de los sistemas de agua potable organizaciones de actividades agrícolas entre otras, en temas como uso eficiente del recurso hídrico, saneamiento ambiental, buenas prácticas agrícolas.

d) Incentivar la implementación y Manejo de bosques naturales para fines de protección y provisión de servicios ambientales. Esta modalidad incluye proyectos de protección de bosques para fuentes de agua, conservación de diversidad biológica, ecoturismo, conservación de germoplasma, protección de sitios sagrados y otros que sean calificados como bosques de protección por la Junta Directiva del INAB; y la incentivación y mantenimiento de bosque con fines energéticos (leña) como fuente primaria de energía para cocción de alimentos.

Tabla 18. Matriz de lineamientos generales para el manejo de las zonas de recarga hídrica.

FIN	AREA DE INTERVENCIÓN	OBJETIVO GENERAL	ACCIONES	OBJETIVOS ESPECIFICOS	RESPONSABLES
Reducción del nivel de degradación, de las zonas potenciales de recarga hídrica	ZONAS DE RECARGA HÍDRICA CON ALTO Y MUY ALTO POTENCIAL	Ampliar la extensión de las zonas identificadas, conservarlas y evitar su deterioro o desaparición, y aumentar el potencial de las zonas identificadas	Declarar como áreas protegidas los bosques mixtos inmersos en las zonas de recarga hídrica con muy alto potencial.	Dirigir las iniciativas existentes hacia la conservación y protección de los recursos forestales.	Autoridades Municipales DMPS DAPMAS INAB CONAP
			Fortalecer las unidades de Gestión Ambiental tales como las DAPMAS de ambos municipios.	Aumentar la capacidad local de administrar los recursos forestales, capacitar y brindar asistencia técnica a las comunidades, en temas de conservación ambiental.	-Autoridades Municipales -INAB -ONGs y -OGs
			Implementar prácticas de manejo sostenible de bosques tales como: Podas -Cortas de selección -Cortas de liberación -Raleos o aclareos -Establecimiento de áreas de regeneración natural -Prácticas de manejo de bosque natural. -Establecimiento de rodales semilleros. -rondas cortafuego para prevención de incendios forestales en época seca.	Garantizar la conservación y manejo apropiado de los bosques, Reducir las pérdidas de masa forestal a causa de incendios forestales naturales o intencionales.	DAPMAS Guardabosques municipales. Propietarios. Organizaciones comunitarias. Consejos de Microcuencas.
			Construcción de estructuras físicas que contribuyan al proceso de infiltración.	Garantizar el abastecimiento de agua a las poblaciones dentro del área de estudio	
			Incentivar los bosques comunales y municipales mediante la integración a los programas de incentivos forestales PINPEP	Promover la recuperación de las tierras con vocación forestal, de manera que favorezcan la recarga hídrica de las zonas intervenidas.	Autoridades municipales [concejal de ambiente] DAPMAS INAB

Fuente: Elaboración propia 2016

FIN	AREA DE INTERVENCIÓN	OBJETIVO GENERAL	ACCIONES	OBJETIVOS ESPECIFICOS	RESPONSABLES
Reducción del nivel de degradación, de las zonas potenciales de recarga hídrica	ZONAS DE RECARGA HÍDRICA CON MODERADO POTENCIAL	Aumentar el potencial de recarga hídrica, dentro de la microcuenca Turbala y evitar el deterioro de los recursos suelo bosque y agua.	Implementar prácticas de conservación de suelos y agua como: Estabilización de cárcavas. Barreras muertas. Barreras vivas. Acequias de ladera. Terrazas individuales. Pozos de absorción (infiltración). Diques de contención. En las zonas de cultivo, con pendientes mayores al 30% de pendiente.	Reducir los efectos adversos de la pendiente y la eliminación de la cobertura forestal, reduciendo así procesos erosivos y deterioro del suelo.	DAPMAS Guardabosques municipales. Propietarios. Organizaciones comunitarias. Consejos de Microcuencas
			Implementar sistemas agroforestales: Huertos mixtos. Árboles en contorno. Sistema frutales deciduos + granos, básicos. Sistema forestal + cultivos. Uso adecuado de los sistemas de riego.	Promover la implementación de sistemas agrícolas sostenibles que a su vez proporcionen una mejor cobertura del suelo.	DMPS DAPMAS OMMS ONG's OG's Asociaciones [Papicultores, cooperativas, productores, etc.] MAGA
			Capacitación y asistencia técnica: Mejoramiento tecnológico de cultivos existentes (granos básicos). Producción y manejo post-cosecha. Manejo integrado de plagas.	Procesos de producción de granos básicos y hortalizas más limpios y eficientes en la utilización de los recursos suelo y agua.	DMPS OMM DAPMAS ONG's MAGA
			Elaborar el primer borrador de ordenamiento territorial municipal, con los COCODES, DAPMATS CONREDS, organizaciones sociales y privadas. ONGs.	Propiciar un ordenamiento urbano-rural ordenado, poniendo énfasis en el uso sostenible de los recursos naturales, a largo plazo.	Autoridades municipales COCODES DAPMAS DMPS OMMS

Fuente: Elaboración propia 2016

FIN	AREA DE INTERVENCIÓN	OBJETIVO GENERAL	ACCIONES	OBJETIVOS ESPECIFICOS	RESPONSABLES
Reducción del nivel de degradación, de las zonas potenciales de recarga hídrica	ZONAS DE RECARGA HÍDRICA CON BAJO POTENCIAL	Reducir el impacto de las condiciones biofísicas que limitan la recarga hídrica.	Implementar prácticas de conservación de suelos y agua como: Estabilización de cárcavas. Barreras muertas. Barreras vivas. Acequias de ladera. Terrazas individuales. Pozos de absorción (infiltración). Diques de contención. En las zonas de cultivo, con pendientes mayores del 30% de pendiente.	Reducir los efectos adversos de la pendiente y la eliminación de la cobertura forestal, reduciendo así procesos erosivos y deterioro del suelo.	DAPMAS Guardabosques municipales. Propietarios. Organizaciones comunitarias. Consejos de Microcuencas
			Adopción del sistema agroforestal "Cultivo en Callejones, en áreas destinadas al cultivo de granos básicos.	Promover la implementación de sistemas agrícolas sostenibles que a su vez proporcionen una mejor cobertura del suelo.	MAGA DMPS DAPMAS OMMS ONG's
			Incentivar los bosques coníferos comunales y municipales y privados mediante la integración a los programas de incentivos forestales PINPEP	Promover la recuperación de las tierras con vocación de producción forestal, de manera que favorezcan la recarga hídrica de las zonas intervenidas.	DAPMAS INAB Autoridades municipales
			Sembrar especies arbustivas nativas tales como palo de agua, miche, sauco, entre otras especies captoras de humedad, en áreas cercanas o en el contorno de las fuentes de agua que abastecen a las comunidades de la microcuenca.	Captar la humedad en el ambiente, beneficiar a los procesos de infiltración y aumentar el caudal de las fuentes de agua.	Comunitarios Beneficiarios de los proyectos de agua potable, comunidad en general.

Fuente: Elaboración propia 2016

XIII CONCLUSIONES

1) De la interpretación de los parámetros morfométricos de este estudio, la microcuenca del río Turbala se cataloga como una cuenca pequeña, por sus índices de forma es oval - oblonga rectangular, es una cuenca muy bien drenada con un tiempo de concentración relativamente bajo, de orden seis respecto a la categoría de su cauce principal según Horton, de relieve accidentado y debido a su índice de masividad se considera como una cuenca montañosa, en términos generales la morfología de la cuenca favorece a la vigorosidad sus avenidas, significando que puede intensificar el caudal en corto tiempo en las desembocaduras y puede manifestarse una crecida fuertemente antes de llegar al cauce principal.

2) La microcuenca Turbala se categoriza de **orden seis** o **categoría seis** ya que según (Horton R. E., 1945) y (Strahler, 1964) una cuenca se categoriza según el orden de su cauce principal resultante.

3) Se determinó que en el 50% del área acumulada de la microcuenca de estudio, se encuentra la altitud de frecuencia media siendo 2769.3 m.s.n.m. la altitud más frecuente es 2763.33 m.s.n.m. y la altitud media es 2640 m.s.n.m. concatenado a un coeficiente de masividad de 61,18, que la cataloga como una cuenca montañosa con altitudes medias elevadas, su relieve es accidentado y con pendientes de la cuenca muy pronunciadas con un promedio de 12.96%.

4) De acuerdo al análisis conjunto de las variables: Pendiente, Tipo de suelo, Cobertura vegetal, Geología y Uso del suelo, las zonas delimitadas de recarga hídrica en base a su potencial son cuatro Bajo [13%], Moderado [79%], Alto [6%] y Muy alto [0.17%]. A partir de estos resultados, el territorio de la microcuenca del río Turbala se considera en su estado actual de potencial bajo a moderado para la recarga hídrica.

5) El potencial *Bajo y Moderado* se debe a las siguientes características condicionantes, Favorables: pendientes menores al 45% que implica una menor velocidad de la escorrentía superficial y por ende un aumento en el potencial de infiltración, Un material parental Qp que son rellenos de piroclásticos, considerados como moderadamente permeables o de permeabilidad primaria; y Desfavorables: un porcentaje muy bajo de cobertura vegetal de 5% a un 45%, un material parental semipermeable Tv que son rocas volcánicas terciarias sin dividir y un cambio de uso del suelo por el avance de la frontera agrícola.

6) Las zonas de *Alto* y *Muy alto* potencial de recarga hídrica son en menor escala distribuidas en su mayoría en la parte baja de la microcuenca, los escenarios condicionantes fueron, Favorables: una cobertura vegetal permanente, que se muestra dominante desde un 60% a 95% por área mapeada, y un uso del suelo con posibilidad de recarga alta y muy alta. Y desfavorables: pendientes que van del 45% al 65% y en algunos casos superiores a este. Sin embargo la variable "pendiente" se ve superada por la cobertura forestal.

7) Con respecto a la variable Textura del suelo, aunque varios autores señalan que existe una estrecha relación entre las clases texturales y la velocidad de infiltración, que significa que debería ser directamente proporcional a las tasas de infiltración, en este estudio observamos que esta no es una regla general, ya que la textura no es la que condiciona necesariamente a la variable velocidad de infiltración, también hay que considerar características intrínsecas del área de muestreo como la estructura, el contenido de humedad en el suelo y ciertos parámetros morfométricos.

8) Las variables que condicionaron en mayor medida el potencial de recarga hídrica para ese estudio fueron: La cobertura vegetal, Pendiente, Uso del suelo y la Geología esto puede corroborarse en los escenarios I y II, sin embargo para el caso de la variable geología no existe una forma de maximizar su potencial debido a que no es una variable manipulable.

9) El impacto que se generaría por el aminoramiento de la cobertura forestal y el cambio uso del suelo dentro la microcuenca del río Turbala implicaría la reducción de su potencial de recarga en un 40% del territorio, esto también enlazaría el inicio de un proceso excesivo de erosión o degradación de sus suelos relacionado su relieve accidentado y un aminoramiento de su recurso hídrico como puede observarse en el escenario I.

10) Las zonas identificadas con potencial moderado, alto y de muy alto, distribuidas en más del 86% del área de estudio; proyectan a la microcuenca del río Turbala con un alto potencial para la recarga hídrica a mediano y largo plazo. Si se invirtieran en proyectos que coadyuven al incremento y mejora de sus recursos naturales, como lo proyecta el escenario II, al aumentar tan solo un 20% la cobertura vegetal e implementar prácticas de conservación de suelos, su potencial se incrementa en un 25%.

XIV RECOMENDACIONES

Propias de la investigación

Se debe planificar, coordinar, e implementar un plan de acción para manejar adecuada y sosteniblemente las zonas de recarga hídrica identificadas, a corto mediano y largo plazo que sin importar su potencial es necesario mejorar las características de toda el área de estudio, principalmente en variables que pueden ser modificadas en desmedro del potencial de recarga hídrica por actividades antropogénicas, como la disminución de la cobertura forestal, un cambio de uso del suelo y la pendiente; puesto que estas tres van vinculadas directamente con la posibilidad de recarga.

A municipalidades, unidades técnicas de planificación, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales.

Las principales prácticas para la conservación de los recursos naturales que deben implementarse, son: reforestación, principalmente con especies nativas, implementación y manejo de obras de conservación de suelo y agua (acequias, pozos de infiltración, terrazas de formación y de banco, barreras vivas y muertas), establecimiento y promoción de sistemas agroforestales y silvopastoriles y rotación de cultivos. Puesto que estas prácticas favorecen o van ligadas intrínsecamente con el potencial de recarga hídrica de las zonas identificadas. Deben de tomarse en cuenta las recomendaciones generales propuestas en la matriz de lineamientos generales para el manejo de las áreas identificadas en el territorio de la microcuenca Turbala.

Es necesario que se inicie un proceso de ordenamiento territorial, puesto que los efectos provocados por el desarrollo urbanístico y económico descontrolado y desordenado, podrían generar la reducción progresiva e irreversible del potencial de recarga hídrica; las autoridades municipales y entidades de planificación deben facilitar este proceso.

A los Departamentos de Planificación Municipal (DMP) de los tres municipios (San Antonio y San Pedro Sacatepéquez del departamento de San Marcos y Palestina de los Altos, Quetzaltenango) y sus distintas dependencias (DAPMA COMRED y COLRED), considerar los aspectos de esta investigación para toma de decisiones, acertadas en función del manejo, gestión y administración de los recursos naturales inmersos en dicha Microcuenca.

Las zonas que presentan un potencial de recarga Alto y Muy Alto, deben ser objeto de manejo especial, hay que incluirlas en el plan de manejo de la microcuenca Turbala y en los proyectos municipales de protección y/o conservación del área. Deben catalogarse como áreas prioritarias para conservar o mejorar su capacidad de captación de agua, es decir, las áreas cubiertas con bosque deben ser manejadas conscientemente.

Las recomendaciones generales para el manejo de las zonas de recarga hídrica, deben ser consideradas y tomadas como base para la planificación de acciones coadyuvantes a la conservación y mejora de los recursos naturales de la microcuenca del río Turbala, en los espacios de toma de decisiones de las organizaciones locales como COCODES, e instituciones presentes en el área.

A la universidad

Esta primera aproximación en función del recurso hídrico debe convertirse en una incentivación para desarrollar investigaciones de esta índole, a pesar de la utilidad que tendrá la información generada, es necesario efectuar una estimación cualitativa y cuantitativa de la recarga hídrica de la microcuenca del río Turbala y la oferta de agua que la misma pueda ofrecer. Queda el desafío propuesto a la carrera de Ingeniería agronomía con orientación en agricultura sostenible, del Centro Universitario de San Marcos abordar esta línea de investigación.

XV BIBLIOGRAFIA

1. A., C. (1992). *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí Mexico.
2. Anaya Fernandez, O. G. (abril de 2012). *Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chichao, distrito de Chincayo, Perú*. Informe profesional, GOBIERNO REGIONAL HUANUCO , GERENCIA DE RECURSOS NATURALES Y GESTION AMBIENTAL, Tingo María Perú.
3. Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (enero del 2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico: Casa abierta al tiempo.
4. CATIE, W. W. (2013). *Bases Hidrológicas para el Manejo de Cuencas*. Manual , CATIE, Hidrología, Costa Rica.
5. Fuentes Junco, J. A. (2004). *Análisis Morfométrico de Cuencas: Caso de estudio del parque nacional Pico de Tancítaro*. Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Investigación, Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, Michoacán Mexico.
6. Fuentes, E. O. (2007). *Gestión integrada de los recursos hídricos, parte alta de la cuenca del río Naranjo, departamentos de San Marcos y Quetzaltenango. Estudio Hidrológico de la cuenca del río Naranjo*. Guatemala.
7. García Alvarez, M. G. (2009). *Determinación de las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en las subcuencas de los ríos Taco y Shusho, Municipio de Chiquimula, Departamento de Chiquimula Guatemala*. Tesis Licenciatura, Centro Universitario de Oriente, Universidad San Carlos de Guatemala, Chiquimula.
8. Gaspari, F. J. (2012). *Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG*. La Plata Argentina.
9. Gordillo Ramírez, C. M. (2010). *Situación actual y directrices para el manejo, de las tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica de Guatemala*. Tesis de licenciatura, Guatemala.
10. Guevara Díaz, J. M. (2003). *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Caracas Venezuela: Gráficas Leon S.R.L.

11. Horton, R. E. (1932). *Drainage basin characteristics* Trans. American Geophysical Union. U.S.A.
12. Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology* Geological Society of America Bulletin. U.S.A.
13. IARNA. (2003). *Estado actual de los recursos hídricos de Guatemala*. Informe Técnico No.1, Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Guatemala.
14. IARNA/URL. (2009). *Perfil ambiental de Guatemala 2008-2009, la señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo* . Guatemala: Serviprensa, S.A.
15. Illescas, J. S. (1974). *Principios de Riego y Drenaje*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
16. INAB / CONAP/ UVG / URL (Instituto Nacional de Bosques, C. N. (2012). *Mapa de cobertura forestal de Guatemala 2010 y dinámica de la cobertura forestal 2006-2010*. Guatemala. Guatemala: Serviprensa, S.A.
17. INAB. (2003). *Clasificación de tierras por capacidad de Uso*. Manual Técnico.
18. INAB. (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Guatemala.
19. INAB. (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica*. Manual Técnico, Guatemala.
20. INAB., I. N. (2005). *Programa de Investigación de Hidrología Forestal*. Guatemala: Serviprensa, S.A.
21. INE, I. N. (2010). *Proyección de poblaciones de Guatemala 2000- 2010 por municipios*. Guatemala.
22. MAGA. (2004). *Atlas Temático de las Cuencas Hidrográficas de Guatemala*. Manual Técnico, Unidad de Planificación Geográfica, y Gestión de Riesgo, Guatemala.
23. MANCUERNA. (2011). *Plan de manejo de la Microcuenca del río Turbalá*. San Marcos, GT.
24. Matus Silva, O. D. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa*. Tesis Magister Scientiae, Turrialba.

25. MINTRABAJO, M. d. (2014). *Acuerdo Gubernativo 537 - 2013, Salario Mínimo 2014*. Obtenido de <http://www.contabilidadpuntual.net/acuerdo-gubernativo-537-2013-salario-minimo-2014/>
26. Pizarro T., R., Flores V., J. P., Sangüesa P., C., & Martínez A., E. (2005). *Modulo 3, para el calculo de la curva de infiltración*. Manual técnico, Universidad de Talca, SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA., Chile. Recuperado Octubre de 2015
27. Rossiter, D. G. (2004). *Metodología para el levantamiento del recurso suelo* (Cuarta Edición ed.). (R. V. Rojas, Trad.) International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC).
28. Ruiz, J. (2001). *Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación*. Barinas - Venezuela.
29. Shumm. (1956). *The fluvial system*. New York.
30. Strahler, A. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*. Mc Graw-Hill. New York - USA.
31. Universidad Politécnica de Valencia. (2010). *Características del Infiltrómetro de doble anillo (Anillos de Munz)*. Documento Técnico, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agronomos, Producción Vegetal, Valencia España.

XVI ANEXOS

16.1 Escenarios

El incorporar el uso del software ArcGis para el análisis espacial del territorio de la microcuenca Turbala, nos permite desarrollar proyecciones de escenarios que podrían suscitarse en el área de la microcuenca. Creando pequeñas variaciones en los valores de entrada [variables]; nos permite apreciar cambios favorables o desfavorables para el potencial de recarga hídrica, y el impacto de aplicar ciertas medidas en la conservación de los recursos naturales y su significancia en un futuro a corto mediano o largo plazo. Para ilustrar la utilidad del procesamiento de datos, dos ejemplos se exponen a continuación:

a) Escenario I

Uno de los escenarios de interés para el análisis espacial de la microcuenca Turbala sería el impacto que tendría la desaparición de la cobertura forestal actual, sobre el potencial de recarga hídrica del área; ya que las comunidades que se ubican dentro del área de estudio generan presión constantemente sobre los recursos naturales, debido a la demanda de tierras para la producción de alimentos (agricultura), principal actividad cuyo impacto se ve acentuado por la creciente población en las zonas rurales.

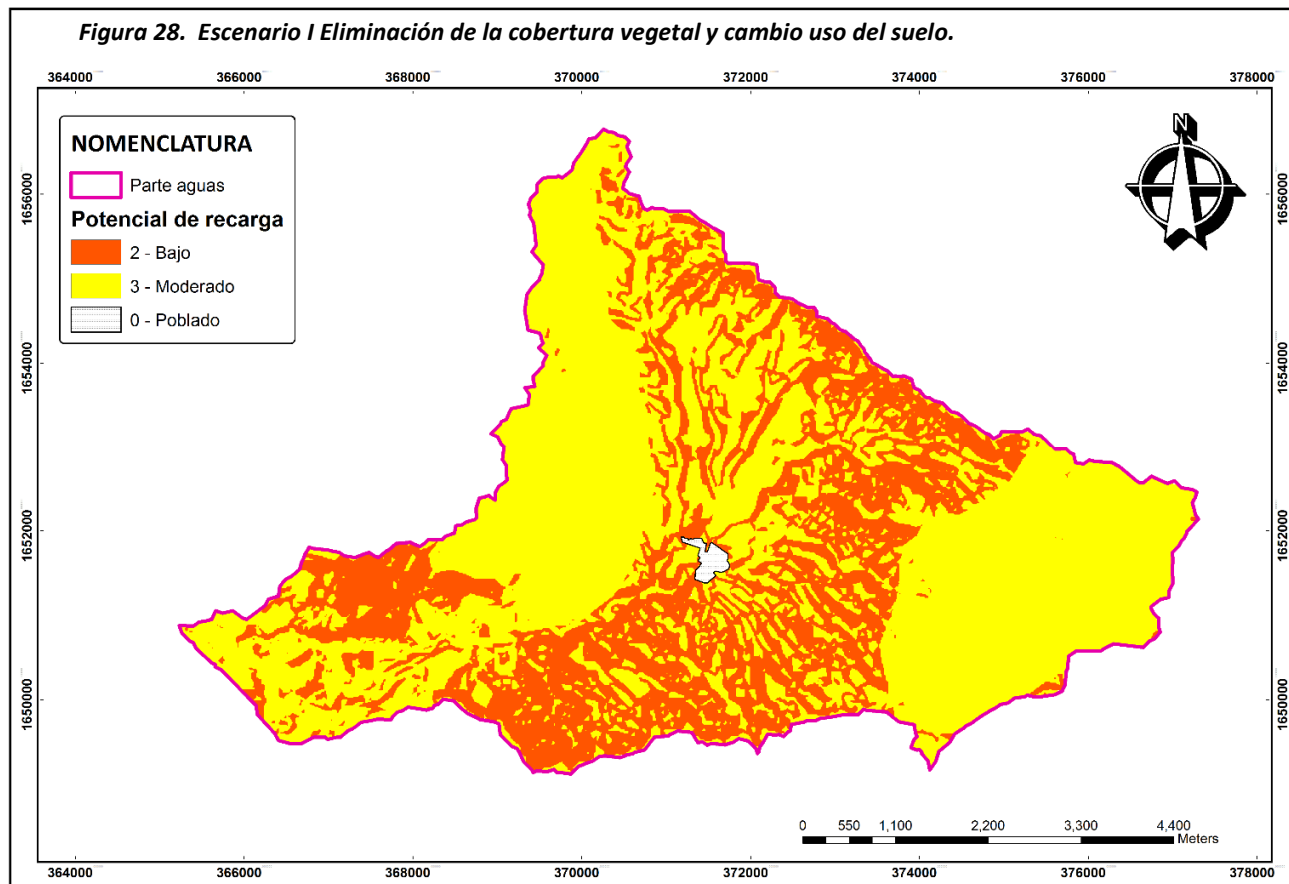
Este fenómeno conocido como “avance de la frontera agrícola” es la principal amenaza para la cobertura vegetal (forestal) existente. Para obtener los resultados de este escenario, el mapa de uso de la tierra fue modificado; las áreas clasificadas como: bosque y vegetación arbustiva baja; fueron modificadas en su categoría por un uso de Agricultura limpia anual, considerando que este cambio sería el más aceptado. Con lo cual el valor de ponderación de estas variables desciende de 5 y 4 respectivamente a 2; esto también afecta la cobertura del suelo, por lo que fue necesario un nuevo cálculo. Terminando de realizar estas modificaciones se procedió a ejecutar un nuevo cálculo bajo las circunstancias antes mencionadas, los resultados se describen a continuación.

Cuadro 14. Escenario I, eliminación de la cobertura vegetal y cambio uso del suelo.

Potencial de Recarga	Valor	Área (m)	Área (Ha)	Area %
Baja	2	14797800	1479.78	34.28
Moderada	3	28235700	2823.57	65.42
Alta	4	0	0	0.00
Muy Alta	5	0	0	0.00

Elaboración propia 2016.

Todos los datos contenidos en el cuadro anterior pueden apreciarse en el mapa siguiente.



Elaboración propia 2016.

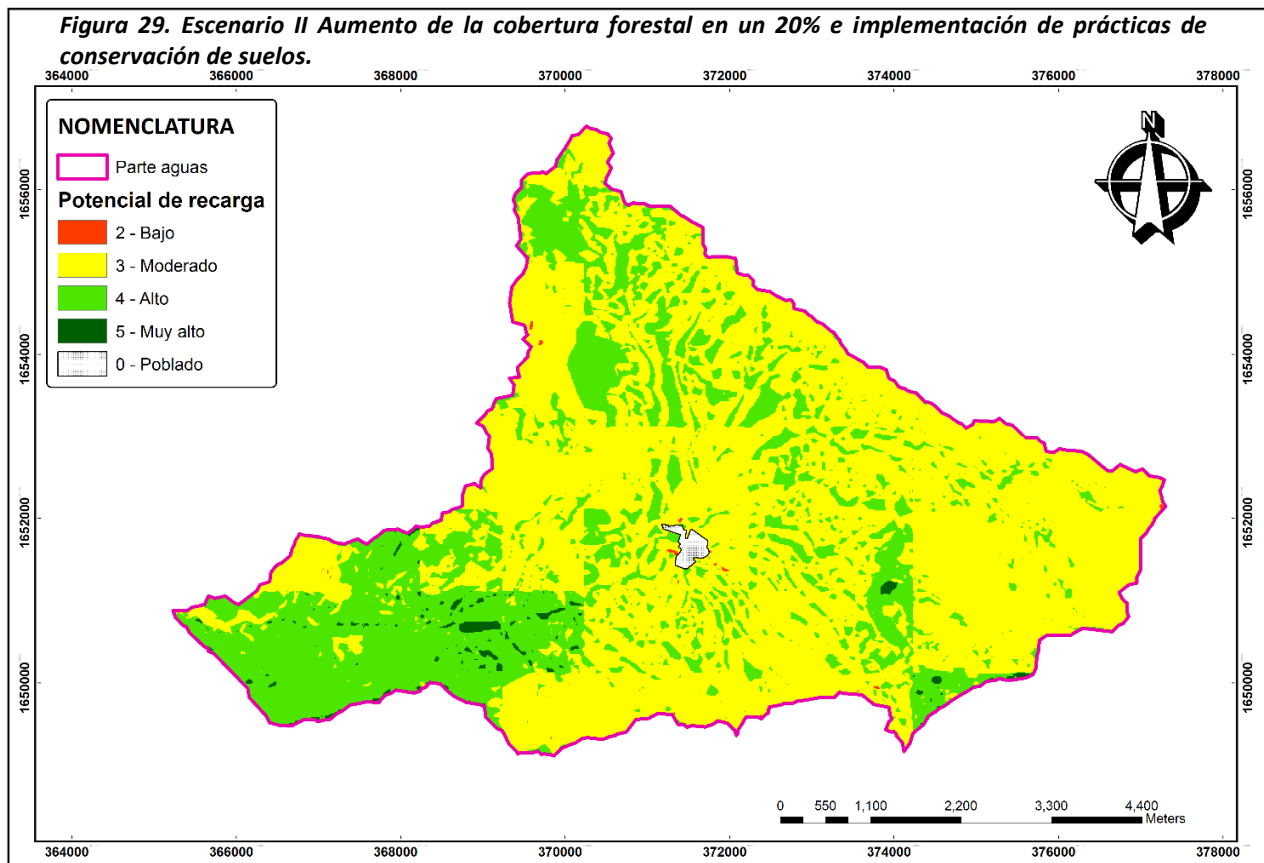
El mapa anterior demuestra que este escenario provoca que el potencial de recarga hídrica se reduzca drásticamente, implicando la desaparición de 7.27 hectáreas con potencial *Muy Alto*, 266.06 hectáreas con un potencial *Alto*, una pérdida de 602.82 hectáreas de potencial *Moderado* y un aumento de 875.77 hectáreas de potencial *Bajo*.

El área con potencial perdido supera el área boscosa eliminada. Esto se explica por la interacción que existe entre las variables de uso de la tierra y cobertura del suelo del modelo metodológico utilizado. De este resultado se puede concluir que la conservación y protección de los bosques existentes debe ser una medida prioritaria a poner en práctica, ya que su efecto sobre el potencial de recarga es evidentemente significativo.

b) Escenario II

En este escenario se plantea el impacto que tendría la recuperación de la cobertura forestal en un 20% en todo el área de estudio; con el objetivo de apreciar en qué áreas el potencial de recarga se ve favorecido por dicho aumento, al igual que la implementación aunada de prácticas de conservación de suelos con la agricultura.

Para ello, el uso del suelo dentro de las zonas que resultaron con un potencial moderado, fue cambiado a “bosque”, y áreas catalogadas como de agricultura limpia anual se cambiaron a “agricultura con prácticas de conservación de suelos”, así mismo el porcentaje de cobertura del suelo fue nuevamente calculado; asumiendo que el bosque ya hubiera alcanzado una edad suficiente para proporcionar una cobertura de más de 80% del suelo, entre 10 y 15 años de edad.



Elaboración propia 2016.

El resultado de este escenario es el incremento del potencial de recarga en un 25% del área de estudio, esto puede apreciarse en el siguiente cuadro.

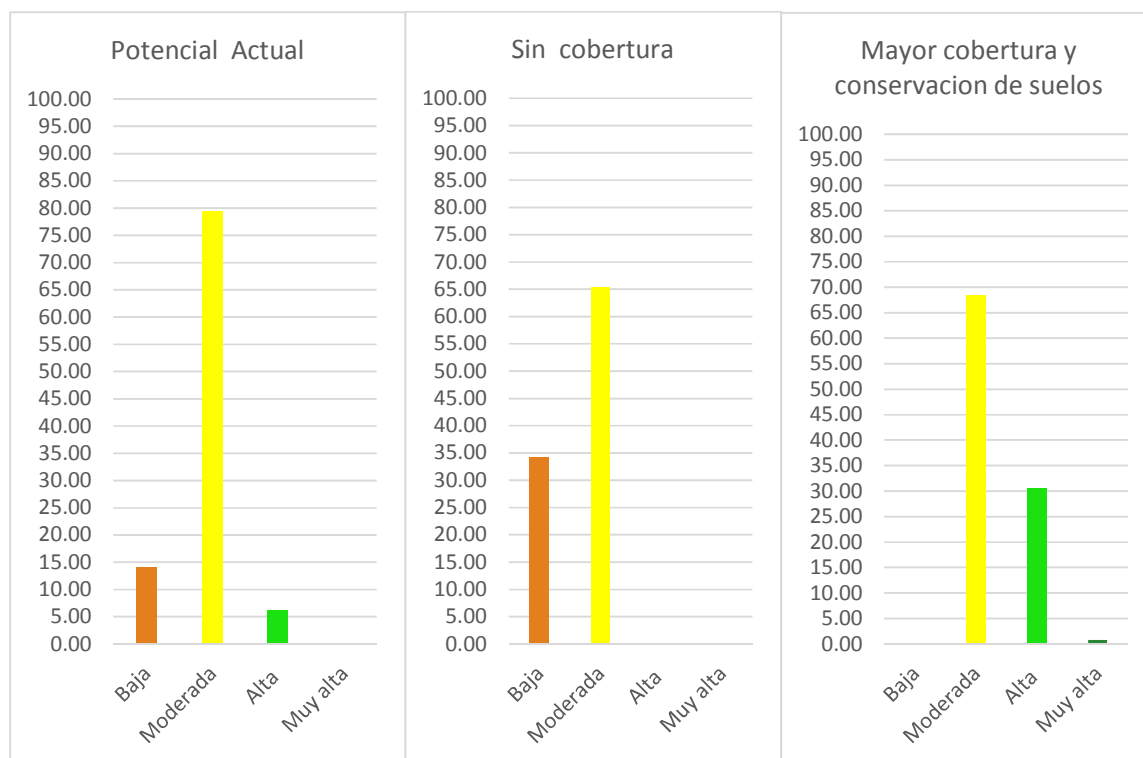
Cuadro 15. Escenario II, Incremento de la cobertura vegetal en un 20% e implementación de prácticas de conservación de suelos.

Potencial de Recarga	Valor	Área (m)	Área (Ha)	Área %
Bajo	2	42525	4.25	0.10
Moderado	3	29579625	2957.96	68.53
Alto	4	13195125	1319.51	30.57
Muy Alto	5	337950	33.8	0.78

Fuente: *Elaboración propia 2016.*

Al analizar los resultados vemos que si se tomara la decisión de emprender proyectos de reforestación y regeneración natural, y la implementación de prácticas de conservación de suelos aunada a la agricultura, el resultado es prometedor, al observar que 1079 hectáreas de potencial alto y muy alto son ganadas, implicando como lo mencionábamos anteriormente es un 25% del total de la microcuenca Turbala, con solo efectuar estos pequeños cambios. La evolución de los cambios efectuados en los distintos escenarios pueden observarse en las siguientes gráficas.

Gráfica 5. Comparación de Escenarios.



Elaboración propia 2016.


16.2 Cronograma de actividades

No.	ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6
1	Recopilación de información cartográfica existente						
2	Delimitación del área de estudio						
3	Determinación de puntos de muestreo para el estudio de suelos						
4	Muestreo para la textura del suelo						
5	Pruebas de infiltración del suelo						
6	Procesamiento de datos para la identificación de zonas de recarga hídrica						
7	Análisis y descripción de las variables que determinan las zonas potenciales de recarga hídrica.						
8	Elaboración del mapa de áreas zonas de según su capacidad de recarga hídrica.						
9	Análisis y descripción de Parámetro morfométricos						
10	Sistematización de la información generada						
11	Reproducción de documento técnico						


16.3 Presupuesto

Presupuesto de la investigación				
RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
PAPELERÍA				
Papel bond	resmas	2	Q 50.00	Q 100.00
Encuadernados	unidades	12	Q 15.00	Q 180.00
Lapiceros	"	2	Q 1.50	Q 3.00
Marcadores	"	2	Q 3.00	Q 6.00
Regla de metal	"	1	Q 5.00	Q 5.00
Cinta adhesiva	rollo	1	Q 5.00	Q 5.00
Tinta (impresiones)	cartuchos	2	Q 100.00	Q 200.00
Fotocopias	unidades	200	Q 0.25	Q 50.00
Sobres manila (bolsas de papel)	"	5	Q 1.00	Q 5.00
Hojas formato A1 (mapas)	"	15	Q 5.00	Q 75.00
COSTOS INDIRECTOS				
Transporte	muestras de suelos y pruebas de infiltración	20	Q 50.00	Q 1000.00
EQUIPO				
Laptop	horas	80	Q 10.00	Q 800.00
SERVICIOS PROFESIONALES				
Estudiante	horas	1248	Q 9.38	Q 11,706.24
Análisis de laboratorio (textura)	muestras	10	Q 150.00	Q 1,500.00
			TOTAL	Q 15,635.24


16.6 Resultados de las muestras de suelo, Laboratorio de suelos.



Gobierno de Guatemala
Ministerio de Agricultura, Gananería y Silvicultura



Laboratorio de Diagnóstico Fitozoosanitario
Laboratorio de Suelos
Quetzaltenango.




RESULTADO DE ANALISIS DE SUELO

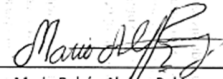
NOMBRE DEL USUARIO: BENJAMIN FELICIANO LUX GARDONA DIRECCIÓN: SAN ANTONIO SACATEPEQUE, SAN MARCOS. FECHA: 18/07/2015
PALESTINA DE LOS ALTOS, QUETZALTENANGO.

No. DE MUESTRA E IDENTIFICACIÓN	CULTIVO	PH	TEXTURA	FOSFORO (p 2.05) ppm	POTASIO (ppm)	MATERIA ORGÁNICA (%)	NITROGENO (%)	ARENA (%)	ARCILLA (%)	LIMO (%)	d.a. (gr./cc)
1- SUELO			FRANCO ARENOSO					70.72	1.28	28	0.833
2 - SUELO			ARENA FRANCOOSA					76.72	3.28	20	1.020
3 - SUELO			ARENA FRANCOOSA					76.72	3.28	20	1.020
4 - SUELO			ARENA FRANCOOSA					76.72	3.28	20	1.000
5 - SUELO			ARENA FRANCOOSA					80.72	3.28	16	1.086
===== U / L =====											
1-San Rafael BOSQUE	2-San Rafael MAIZ	3-Santa Irene	4- Santa Rosa	Lima	5- Los Gonzales BOSQUE						

El significado de los resultados del análisis véalos al reverso de la hoja.


 Ing. Agr. Víctor Hugo Carrascosa Natareno
 JEFE DE LABORATORIO DE SUELOS





 Mario Rubén Alpeyrez Ralda
 TÉCNICO DE LABORATORIO



Gobierno de Guatemala
Ministerio de Agricultura, Gananería y Silvicultura



Laboratorio de Diagnóstico Fitozoosanitario
Laboratorio de Suelos
Quetzaltenango.

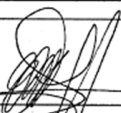


RESULTADO DE ANALISIS DE SUELO

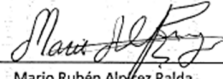
NOMBRE DEL USUARIO: BENJAMIN FELICIANO LUX GARDONA DIRECCIÓN: PALESTINA DE LOS ALTOS, QUETZALTENANGO FECHA: 28/07/2015

No. DE MUESTRA E IDENTIFICACIÓN	CULTIVO	PH	TEXTURA	FOSFORO (p 2.05) ppm	POTASIO (ppm)	MATERIA ORGÁNICA (%)	NITROGENO (%)	ARENA (%)	ARCILLA (%)	LIMO (%)	d.a. (gr./cc)
1- SUELO			ARENA FRANCOOSA					76.72	3.28	20	0.925
2 - SUELO			ARENA FRANCOOSA					80.72	5.28	14	1.111
3 - SUELO			FRANCO ARENOSO					70.72	1.28	28	0.943
4 - SUELO			FRANCO ARENOSO					84.72	5.28	10	0.980
5 - SUELO			FRANCO ARENOSO					82.72	3.28	14	1.086
===== U / L =====											
1- Los Gonzales BOSQUE	2- Los Perez MAIZ	3- Los Perez BOSQUE	4- EL Socorro BOSQUE	5- Toj Pic.							

El significado de los resultados del análisis véalos al reverso de la hoja.

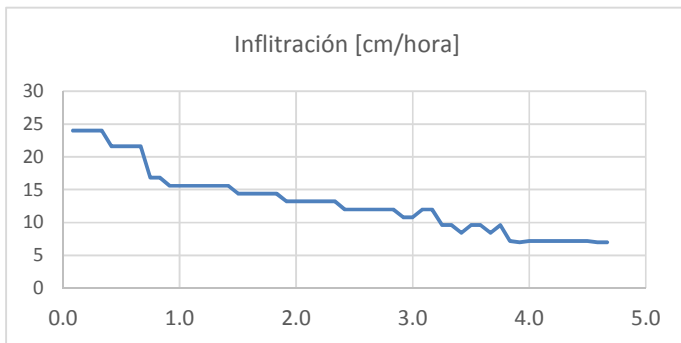

 Ing. Agr. Víctor Hugo Carrascosa Natareno
 JEFE DE LABORATORIO DE SUELOS



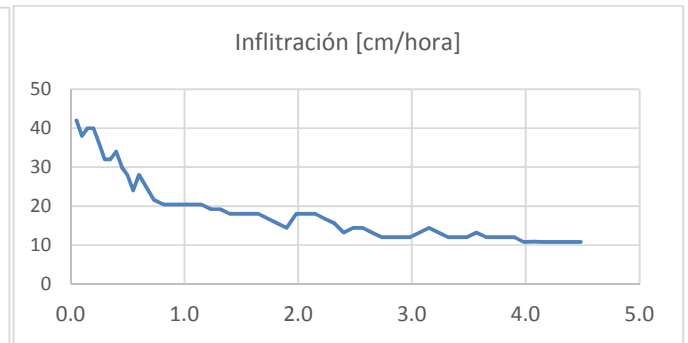

 Mario Rubén Alpeyrez Ralda
 TÉCNICO DE LABORATORIO

16.7 Graficas de los resultados de las pruebas de infiltración.

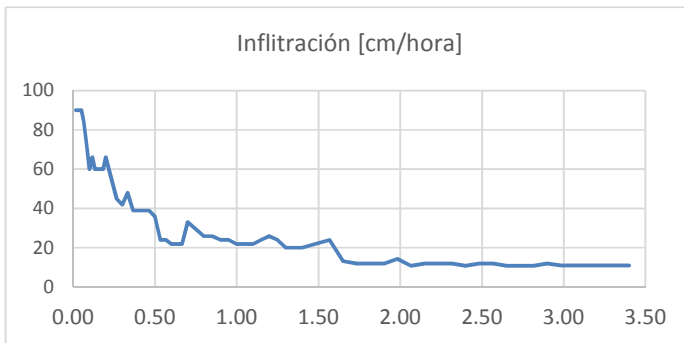
Punto No.1



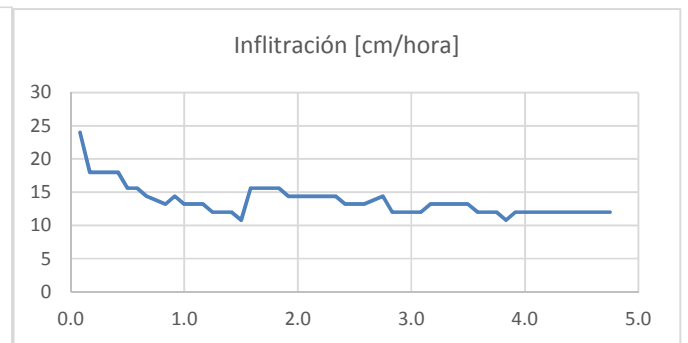
Punto No.2



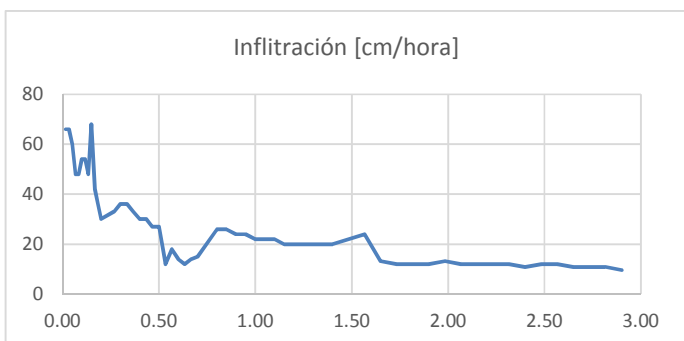
Punto No.3



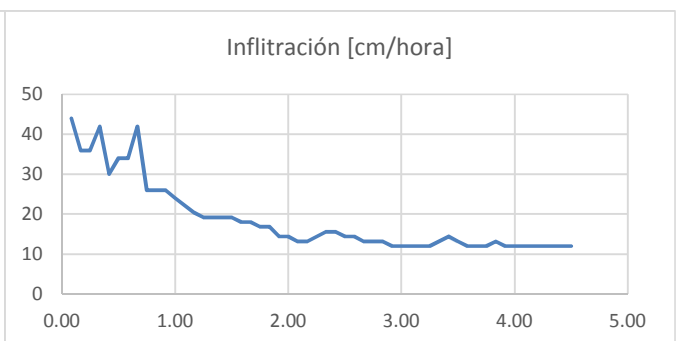
Punto No.4



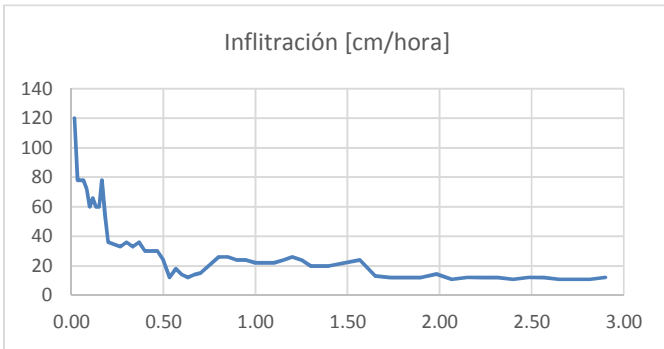
Punto No.5



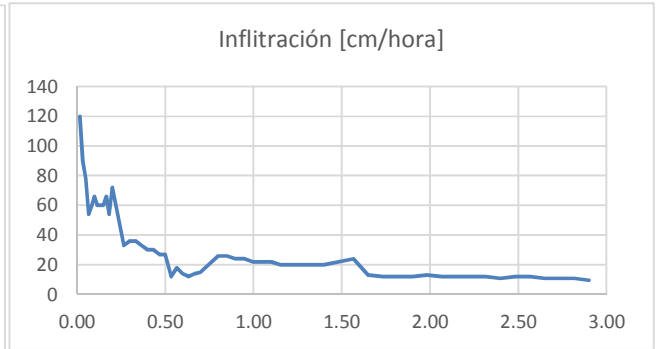
Punto No.6



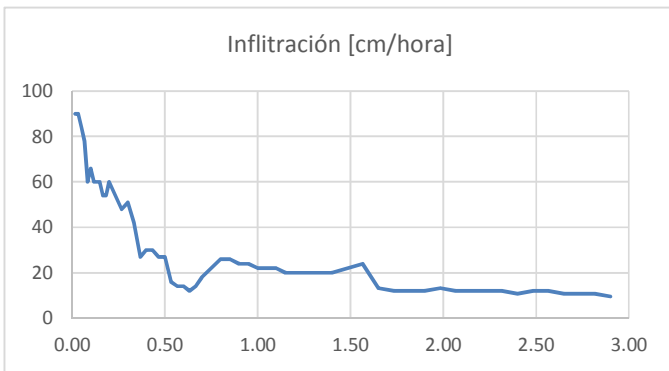
Punto No. 7



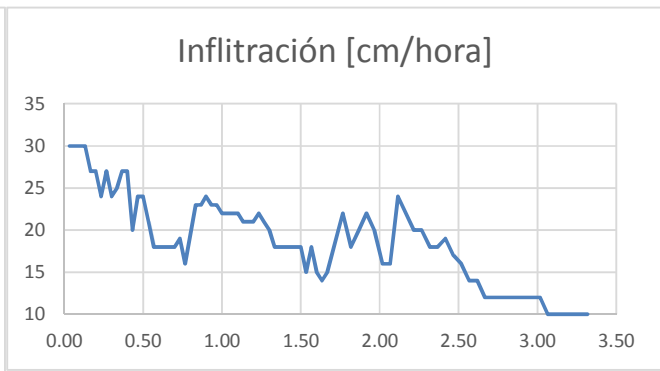
Punto No. 8



Punto No.9



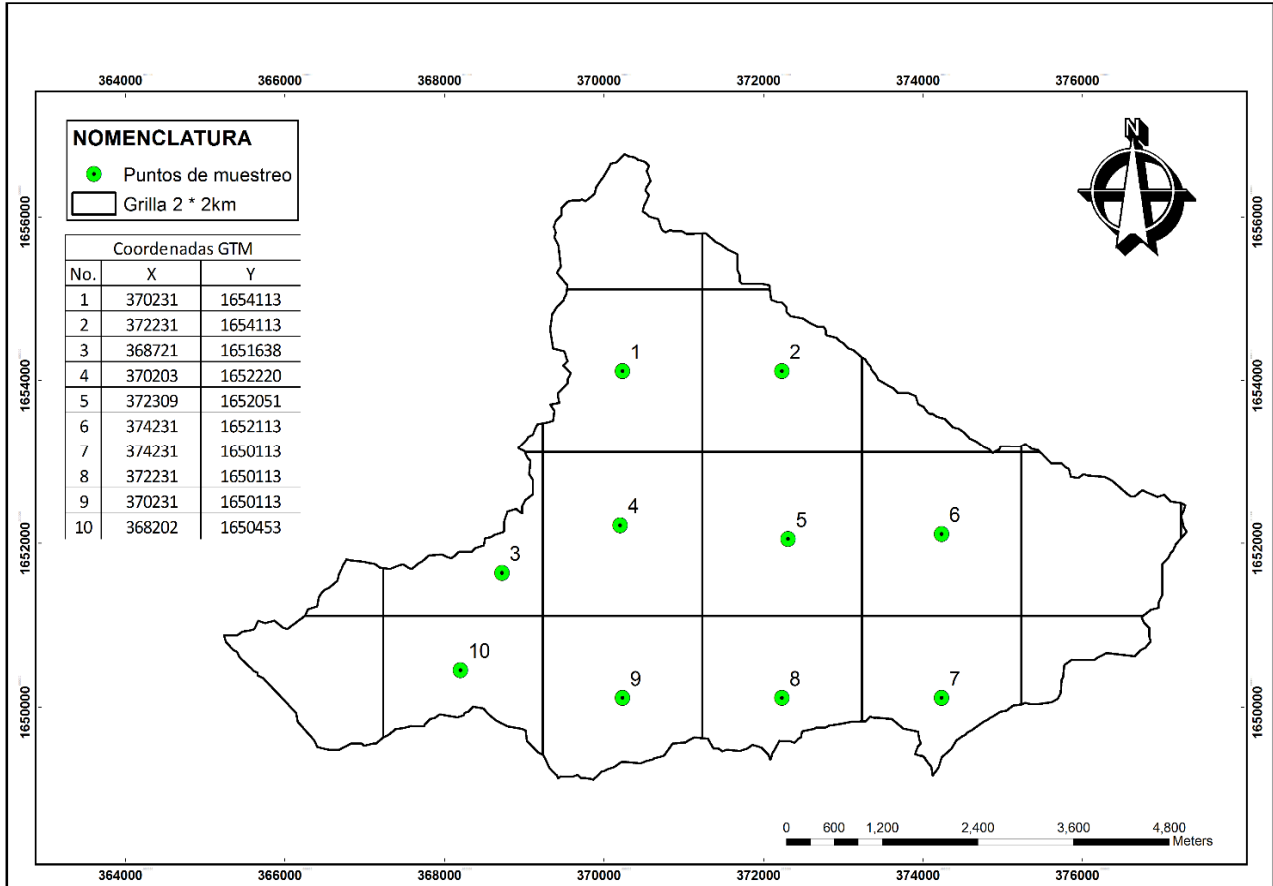
Punto No. 10



16.7.1 Pruebas de infiltración en campo



16.7.2 Mapa de distribución de puntos de muestreo para determinar clase textural y velocidad de infiltración.



16.8 Ubicación municipal de las zonas de recarga hídrica de la microcuenca Turbala.

